

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en INGENIERIA DE TECNOLOGIAS Y SERVICIOS  
DE TELECOMUNICACION**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DE UN ARRAY DE ANTENAS PLANO PARA  
SISTEMAS DE REFERENCIA DE GNSS**

**Julio Díez Alcolea**  
**Tutor: Miguel Alejandro Salas Natera**  
**Ponente: José Luis Masa Campos**

**Julio 2018**



# **DISEÑO DE UN ARRAY DE ANTENAS PLANO PARA SISTEMAS DE REFERENCIA DE GNSS**

**AUTOR: Julio Díez Alcolea**  
**TUTOR: Miguel Alejandro Salas Natera**

**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Julio de 2018**



## Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado trata sobre los arrays de antenas y de su funcionamiento. En él vamos a ver cuál va a ser la finalidad de su uso y analizaremos las opciones de distribución de sus elementos, esto es, de cómo tenemos que colocar los distintos elementos para conseguir nuestro propósito, que no es otro que aumentar la ganancia del sistema y tener capacidad de apuntamiento o de cancelación de interferencias. Además, veremos cómo tenemos que alimentar estos elementos para que nuestro lóbulo principal apunte a una dirección deseada. Este trabajo va a estar enfocado en los sistemas de GNSS, los cuales están presentes en distintos ámbitos que pueden estar dentro de aplicaciones militares o civiles.

Los pasos seguidos en esta memoria son, en primer lugar, explicar los conceptos necesarios para poder entender cómo funcionan. En segundo lugar, revisar el elemento que vamos a usar como punto de partida, y sus características. En tercer lugar, vamos a ver la geometría y distribución de array que vamos a usar y el número de elementos de cada uno. Por último, veremos los resultados que hemos obtenido y de si es posible lo que hemos descrito en cuanto a controlar el apuntamiento.

Todo esto lo vamos a poder ver en el diagrama de radiación que nos muestre el programa CST, comparándolo con simulaciones del factor de array y diagramas en Matlab®, con lo que podremos sacar nuestras propias conclusiones.

## Abstract (English)

This Bachelor Thesis speaks about Antennas Arrays and how they work. In it, we are going to see which the finality of the use of this kind of systems is and also how we are going to analyze the options of the distribution of the elements in the array, it means how we are going to place them to reach our purpose which is increase the gain of the system and point to the place we want or cancel the interferences. In addition, we are going to see how we have to feed these elements for its principal lobe points to the desired address. This thesis is focused in the GNSS systems, whose are implemented in different areas like military or civilians.

The steps we are going to follow in this thesis are, in first place, explain the necessary concepts for understand how it works. In second place, we are going to check the element which we are going to use like start point and its characteristics. In third place, we are going to see the geometry used in the different arrays and the numbers of elements of each one. At the last point, we are going to check the results that we will obtain and if it's possible that we said before about directing the point of the principal lobe.

We are going to see everything in the radiation pattern, that CST tools shows us, comparing with the simulations of the array factor and patterns in Matlab®, with it we could make our own decisions.

## **Palabras clave (castellano)**

Array, diagrama de radiación, GNSS, polarización circular a derechas (RHCP), factor de array, componente copolar, componente contrapolar, longitud de onda.

## **Keywords (inglés)**

Array, radiation pattern, GNSS, right hand circular polarization (RHCP), array factor, copolar component, crosspolar component, wavelength.



## ***Agradecimientos***

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres Julio y Carmen y a mi hermano Álvaro, los cuales cada día se esfuerzan por mejorarme como persona y apoyarme en todo momento. Son muchas las razones por las que les tengo que dar las gracias, ya que sin ellos no sería lo que soy ahora. Me hacen crecer como persona, dándome esos consejos que me están llevando tan lejos. Porque siempre que tengo cualquier problema, cualquier contratiempo y cualquier dificultad, ellos saben las palabras que necesito oír y como convertir esa frustración en fuerzas para poder superar todos los obstáculos. En definitiva, como se que vais a estar leyendo esto, gracias por ser como sois y por no dejar de creer en mí, porque solo necesito eso para poder ser feliz, y estar vuestro lado es lo mejor que me ha podido pasar.

En segundo lugar, darle las gracias a una de las personas que más me han marcado en mi vida, mi abuela. Gracias por esos sabios consejos y por esos días de no parar de reír hasta que me doliera la cara. Me has enseñado que para ser como tú necesito aprender todavía mucho, pero lo estoy haciendo solamente para que te sientas orgulloso de mí.

En tercer lugar, gracias a todas esas personas que sin ser de sangre, las tengo por mi familia. Siempre que he necesitado ayuda me la habéis dado, haciéndome ver que las cosas no son tan malas como parece. Siendo mi pilar fundamental, aguantándome día tras día y sabiendo que siempre estaréis ahí cuando os necesite y no me dejaréis caer, “always and forever”.

A continuación, darles las gracias a mis tres ángeles que donde quieran que estén me están cuidando y apoyando. Espero que estéis orgullosos de lo que soy, porque siempre pienso en cuáles serían vuestras palabras y decisiones.

Por último, agradecer a mi tutor Miguel la oportunidad que me ha dado para poder hacer este trabajo y la confianza que ha depositado en mí.





## INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	5
1.1	Motivación.....	5
1.2	Aplicaciones .....	5
2	Marco teórico.....	6
2.1	Array de antenas .....	6
2.1.1	Campo radiado de un array y Factor de array .....	6
2.1.2	Geometrías de array de antenas .....	7
2.1.3	Arrays lineales equiespaciados .....	8
2.1.4	Arrays planos .....	8
2.1.5	Tipo de alimentación. ....	9
2.1.6	Margen visible. ....	12
2.1.7	Broadside y Endfire. ....	12
2.2	GNSS.....	13
3	Caso de estudio.....	14
3.1	Requisitos de sistema y especificaciones del diseño .....	14
3.2	Parámetros importantes para el análisis del diseño .....	14
3.2.1	Diagrama de radiación.....	14
3.2.2	Pesos de cada uno de los elementos del array .....	14
4	Revisión de las herramientas del diseño.....	15
4.1	CST 15	
4.2	Matlab® .....	15
5	Simulación de array de antenas .....	15
5.1	Selección de geometría.....	15
5.2	Descripción de los componentes de del array seleccionado y su distribución .....	15
5.2.1	Elemento radiante .....	16
5.2.2	Distribución de los elementos.....	19
5.3	Descripción de la implementación de diseño inicial en CST. Diagrama de flujo de la metodología. ....	20
6	Análisis de los resultados .....	22
7	Conclusiones.....	31
8	Líneas futuras .....	32
9	Bibliografía.....	33
	Glosario .....	35
	Anexos .....	- 1 -
A	Herramienta de diseño .....	- 1 -
B	Herramienta de cálculo .....	- 3 -

# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS DE UN ARRAY LINEAL [9].	7
FIGURA 2-2: ESQUEMA DE ARRAY DE ANTENA Y SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA [10].	7
FIGURA 2-3: EJEMPLO DE ANTENA CONFORMADA CON SUB-ARRAYS PLANOS SOBRE ESTRUCTURA GEODÉSICA [3].	8
FIGURA 2-4: PARCHE CON ALIMENTACIÓN POR LÍNEA MICROSTRIP [5].	9
FIGURA 2-5: A) ALZADO DE PARCHE CIRCULAR CON ALIMENTACIÓN POR SONDA COAXIAL Y B) VISTA LATERAL DE PARCHE CIRCULAR CON ALIMENTACIÓN POR SONDA COAXIAL [5].	10
FIGURA 2-6: PARCHE CON ALIMENTACIÓN DE ACOPLLO POR APERTURA [5].	10
FIGURA 2-7: PARCHE CON ALIMENTACIÓN DE ACOPLLO POR PROXIMIDAD [5].	11
FIGURA 2-8: RED DE ALIMENTACIÓN TIPO MIXTA [2].	11
FIGURA 2-9: MARGEN VISIBLE [2].	12
FIGURA 2-10: EJEMPLO DE FACTOR DE ARRAY: A) ARRAY DE EXPLORACIÓN BROADSIDE, Y B) ARRAY DE EXPLORACIÓN ENFIRE. [2].	13
FIGURA 5-1: ELEMENTO RADIANTE [7].	17
FIGURA 5-2: PUERTOS DEL ELEMENTO RADIANTE [7].	17
FIGURA 5-3: PARÁMETRO $S_{11}$ DEL ELEMENTO RADIANTE	17
FIGURA 5-4: FARFIELD 3D A 1.3 GHz DEL ELEMENTO RADIANTE	18
FIGURA 5-5: FARFIELD EN CARTESIANAS A 1.3 GHz DEL ELEMENTO RADIANTE	18
FIGURA 5-6: FARFIELD 3D A 1.6 GHz DEL ELEMENTO RADIANTE	18
FIGURA 5-7: FARFIELD EN CARTESIANAS A 1.6 GHz DEL ELEMENTO RADIANTE	19
FIGURA 5-8: SEPARACIÓN ENTRE ELEMENTOS DE UN ARRAY [8].	19
FIGURA 5-9: ARRAY DE 2 ELEMENTOS	20
FIGURA 5-10: ARRAY DE 4 ELEMENTOS	21
FIGURA 5-11: ARRAY DE 16 ELEMENTOS	21
FIGURA 6-1: A) RADIACIÓN ARRAY DE 2 ELEMENTOS Y B) FARFIELD POLAR ARRAY DE 2 ELEMENTOS	22
FIGURA 6-2: A) COPOLAR ARRAY DE 2 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 2 ELEMENTOS.	23

FIGURA 6-3: A) RADIACIÓN ARRAY DE 4 ELEMENTOS Y B) FARFIELD POLAR ARRAY DE 4 ELEMENTOS .....	24
FIGURA 6-4: A) COPOLAR ARRAY DE 4 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 4 ELEMENTOS ..	24
FIGURA 6-5: A) RADIACIÓN ARRAY DE 16 ELEMENTOS Y B) FARFIELD POLAR ARRAY DE 16 ELEMENTOS.....	25
FIGURA 6-6: A) COPOLAR ARRAY DE 16 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 16 ELEMENTOS .....	25
FIGURA 6-7: A) FARFIELD POLAR ARRAY CON PESOS DE 2 ELEMENTOS Y B) FARFIELD CARTESIANAS ARRAY DE 2 ELEMENTOS CON PESOS .....	27
FIGURA 6-8: A) COPOLAR ARRAY CON PESOS DE 2 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 2 ELEMENTOS CON PESOS .....	27
FIGURA 6-9: A) FARFIELD POLAR ARRAY CON PESOS DE 4 ELEMENTOS Y B) FARFIELD CARTESIANAS ARRAY DE 4 ELEMENTOS CON PESOS .....	28
FIGURA 6-10: A) COPOLAR ARRAY CON PESOS DE 4 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 4 ELEMENTOS CON PESOS .....	29
FIGURA 6-11: A) FARFIELD POLAR ARRAY CON PESOS DE 16 ELEMENTOS Y B) FARFIELD CARTESIANAS ARRAY DE 16 ELEMENTOS CON PESOS.....	30
FIGURA 6-12: A) COLAR ARRAY CON PESOS DE 16 ELEMENTOS Y B) CROSSPOLAR ARRAY DE 16 ELEMENTOS CON PESOS .....	30
FIGURA 0-1: MENÚ MODELING DE CST .....	- 1 -
FIGURA 0-2: MENÚ SIMULATION DE CST .....	- 1 -
FIGURA 0-3: MENÚ HOME DE CST .....	- 2 -
FIGURA 0-4: CST ARRAY WIZARD.....	- 2 -
FIGURA 0-5: MATLAB.....	- 4 -

## INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: FRECUENCIAS DE TRABAJO DE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE GNSS [5].....	14
TABLA 5.1: FRECUENCIAS DE TRABAJO DE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE GNSS .....	19
TABLA 6.1: GANANCIAS DE ARRAY DE ANTENAS DE 2 ELEMENTOS .....	23
TABLA 6.2: GANANCIA, DIRECTIVIDAD Y ANCHO DE HAZ DE ARRAY DE ANTENAS DE 4 ELEMENTOS .....	24
TABLA 6.3: GANANCIAS DE ARRAY DE ANTENAS DE 16 ELEMENTOS .....	26
TABLA 0.1: TABLA DE DESFASES PARA APUNTAMIENTO EN ARRAY DE 2 ELEMENTOS .....	- 4 -
TABLA 0.2: TABLA DE DESFASES PARA APUNTAMIENTO EN ARRAY DE 4 ELEMENTOS .....	- 4 -
TABLA 0.3: TABLA DE DESFASES PARA APUNTAMIENTO EN ARRAY DE 16 ELEMENTOS .....	- 4 -

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

Esta memoria habla de la distribución de los elementos de un array de antenas y de los distintos resultados que podemos obtener al posicionarlos de una forma u otra, es decir, modificar su distribución. Los principales objetivos que dichos arrays buscan, vienen dados por una serie de características, que entre otras son:

- Disminución del multitrayecto: se denomina multitrayecto a los diferentes caminos que puede tomar una onda que cuando la transmitimos desde un emisor hasta un receptor. Estos diferentes caminos, pueden venir dados por rebotes que son originados por obstáculos que dicha onda puede encontrar en el recorrido. Mediante estos arrays, lo que podemos conseguir es apuntar a un receptor deseado y, por tanto, poder elegir el camino óptimo para que no haya tantos rebotes y producir una disminución de las pérdidas en la propagación.
- Mejora de la seguridad: la cual podemos aumentar o disminuir dependiendo de la forma y la distribución de los elementos del array. Podemos hacer que la máxima radiación apunte a un o unos satélites en concreto y que a las otras ondas interferentes provenientes de otras direcciones se le asigne la mínima ganancia posible, haciendo que la potencia con la que llegan estas ondas interferentes sea la mínima posible.

## 1.2 Aplicaciones

Los arrays de antenas están hoy en día muy presentes en los sistemas de comunicaciones inalámbricas o también llamadas por el aire (*Wireless*). Una de las mayores aplicaciones que tiene es en la telefonía móvil, la cual viene dada de que cuando un usuario emite una llamada el array de antenas pretende dar la mayor cobertura posible tanto al emisor como al receptor de dicha llamada. Por tanto, debido a esto, el conjunto de antenas va a tener como objetivo apuntar con su lóbulo principal al usuario deseado y a los otros que estén en su radio de cobertura, transmitirle la mínima potencia de señal o incluso ponerle un nulo en la recepción de las interferencias. Esto es lo que buscan todos los arrays de antenas inteligentes, las cuales van cambiando su ángulo de apuntamiento de forma “óptima” hasta lograr dar el servicio óptimo a un par de usuarios que están entablando una transmisión entre ellos.

Otra posible aplicación de estas agrupaciones de elementos con apuntamiento “óptimo” puede ser en el ámbito de los satélites, ya que si un satélite es geoestacionario (es decir, gira con la misma velocidad que la Tierra sobre su propio eje) dicho array va a tener como finalidad apuntar constantemente a él para poder dar servicio a las comunicaciones satelitales existentes a bordo de vehículos en movimiento.

Normalmente, cuando hablamos de la localización de un individuo, satélite, o en general, la posición de cualquier cuerpo, estamos utilizando el concepto de GNSS (Global Navigation Satellite System), el cual tiene como propósito general identificar estos cuerpos mediante localización satelital. Esta localización viene dada por la distancia que tienen como referencia los distintos satélites que pueden ver este objeto o cuerpo, y que, mediante estos tipos de medidas, pueden asegurar donde y en qué posición está, y/o a qué velocidad va dicho usuario u objeto. Aunque inicialmente nace como un sistema militar, cuya finalidad de su uso es proveer de la información necesaria a las distintas fuerzas militares [1], hoy en día tiene, además de sus aplicaciones militares, innumerables usos y aplicaciones civiles.

## 2 Marco teórico

---

En esta sección presentamos una breve introducción y descripción del marco teórico, enfocado en aspectos técnicos relacionados con los sistemas bajo estudio. Por ello, presentaremos aspectos básicos sobre arrays de antenas, sistemas GNSS, geometrías y las distintas formas de alimentación en un array.

### 2.1 Array de antenas

Hasta ahora hemos visto las posibles aplicaciones y las distintas motivaciones a la hora de hacer un array de antenas, pero ¿qué es realmente un array de antenas?

Un array de antenas consiste en un conjunto de elementos radiantes (antenas) los cuales se posicionan de diferentes formas para poder conseguir, en primer lugar, aumentar la ganancia y directividad de nuestra antena tanto receptora como transmisora, como, en segundo lugar, apuntar a un ángulo dado y poder elegir nosotros mediante la amplitud y fase de alimentación de cada uno de nuestros elementos radiantes donde queremos que vaya el máximo de nuestra onda. Cada tipo de colocación de los elementos de un array lo veremos en la siguiente sección 5.1 Selección de geometría.

Pero antes de hablar de tipo de colocación de los elementos, primero tenemos que saber cómo funciona un array y sus principales características.

#### 2.1.1 Campo radiado de un array y Factor de array

El campo radiado de un array de antenas se puede obtener, como podemos observar en la ecuación 0, mediante la suma de todos los campos de cada uno de los elementos que forman el array. Dicho campo radiado de cada elemento es denominado campo radiado del elemento unitario, y consiste en la forma en la que el elemento radia o emite las distintas ondas [2].

$$\vec{E}_A(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \vec{E}_0(r, \theta, \phi) \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2.1)$$

Así mismo, podemos establecer el concepto de factor de array, que se obtiene de sacar factor común el campo de (2.1) y dejar el sumatorio multiplicado por el campo del elemento unitario, lo cual no daría lugar a la fórmula del caso (2.2).

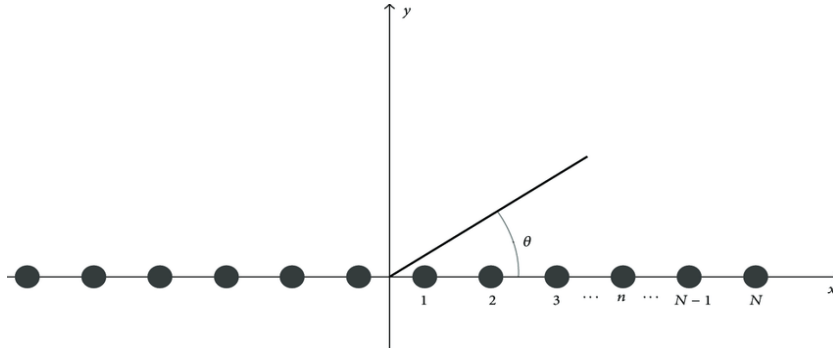
$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2.2)$$

Por tanto, podemos decir, que el campo radiado de un array va a ser el producto entre el campo del elemento unitario por el factor de array.

### 2.1.2 Geometrías de array de antenas

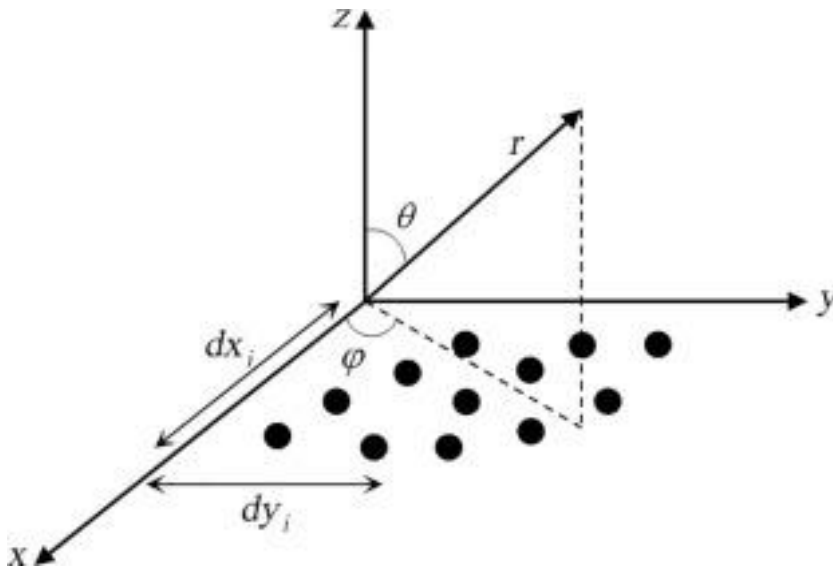
Los distintos arrays se clasifican en tres distintas categorías según su diseño:

- **Lineales:** los elementos que forman el array de antenas se disponen de forma lineal en un solo eje que puede ser el x, y o z. Dependiendo de en qué eje pongamos dichos elementos la respuesta que obtengamos va a tener unas propiedades y otras, como por ejemplo a dónde apunta el array.



**Figura 2-1: Disposición de los elementos de un array lineal [9].**

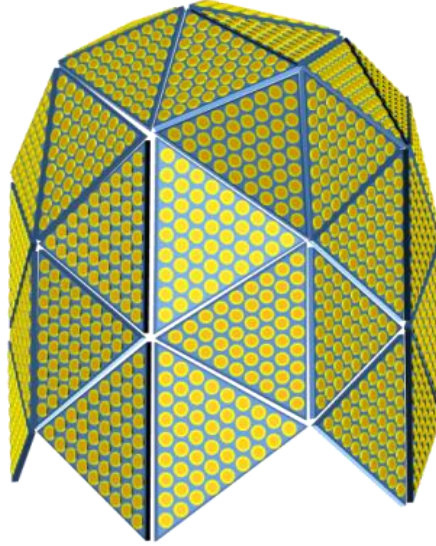
- **Planares:** los elementos del array se posicionan a lo largo de un plano formado por los ejes de coordenadas citados anteriormente. Pueden ser Reticulares (Elementos dispuestos en los nudos de una retícula), Circulares (Elementos dispuestos sobre circunferencias concéntricas) o Aleatorios (Elementos dispuestos en puntos aleatorios del plano)



**Figura 2-2: Esquema de array de antena y sistema de coordenadas de referencia [10].**

- Conformados: Lo elementos del array se disponen sobre formas específicas: cilíndricos, piramidales, esféricos, dodecaedros (como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) o superficies diversas.





**Figura 2-3: Ejemplo de antena conformada con sub-arrays planos sobre estructura geodésica [3]**

### 2.1.3 Arrays lineales equiespaciados

Como su propio nombre indica, los arrays equiespaciados son aquellos en los que los elementos que conforman el array se encuentran a la misma distancia “d” unos de otros. Normalmente, solemos encontrarlos sobre uno de los ejes de coordenadas, en nuestro caso, nos vamos a centrar en el eje z. Debido a esto, nuestro vector de la ecuación (2.3) va a venir dado por esa expresión en la que “n” es el número de elementos del array y “d” la distancia de separación entre uno y otro.

$$\vec{r}_n = n \cdot d \cdot \hat{z} \quad (2.3)$$

Esto provoca que nuestro factor de array cambie, dando lugar a la igualdad (2.4), la cual se obtiene de sustituir el vector de (2.3) dentro de la ecuación (2.1).

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d \cdot \cos\theta + \alpha_n)} \quad (2.4)$$

### 2.1.4 Arrays planos

Los arrays planos son una variante de los arrays lineales. Como hemos visto en el punto 2.1.2 Geometrías de array de antenas, los arrays planares se caracterizan, como su propio nombre indica, por tener los elementos sobre un plano. Estos van a ser el objeto de estudio de este trabajo, debido a que, como veremos en la sección 5.2.2.

### 2.1.5 Tipo de alimentación.

Otro de los puntos que también es muy importante de cara a la realización del proyecto, es la alimentación o el sistema que implementemos para alimentar a nuestro array. Gracias a esto podemos hacer que el array apunte a una dirección u otra, lo cual en las tecnologías que usa GNSS es clave, debido a que como hemos comentado anteriormente, si en el ámbito militar, queremos que nuestro lóbulo principal apunte a un sitio dado donde se encuentra un cuartel, para que llegue con la máxima ganancia posible y la SNR aumente, vamos a tener que alimentar dicho array de una forma distinta a si quisiéramos transmitir información a otro cuartel situado en otro lugar.

Los distintos métodos que tenemos para alimentar un array vienen marcados por si queremos que la alimentación esté en contacto con la antena o no. Si queremos que esté en contacto, las formas más comunes de alimentación son:

- Línea microstrip: es el método más sencillo. Consiste en conectar una línea microstrip a cada uno de los puertos o entradas que tenga nuestro elemento para, a través de estos, alimentar la antena y hacer que radie. Generalmente esta línea es mucho más pequeña que el parche o la antena que tengamos y mediante esta, podemos controlar la impedancia de entrada [3]. Por el contrario, un inconveniente del uso de esta técnica es que se produce radiación espuria y acoplos entre la propia línea y el parche. En la Figura 2-4: Parche con alimentación por línea microstrip , podemos ver un parche que está alimentado con una línea coaxial que acaba al final del propio sustrato.

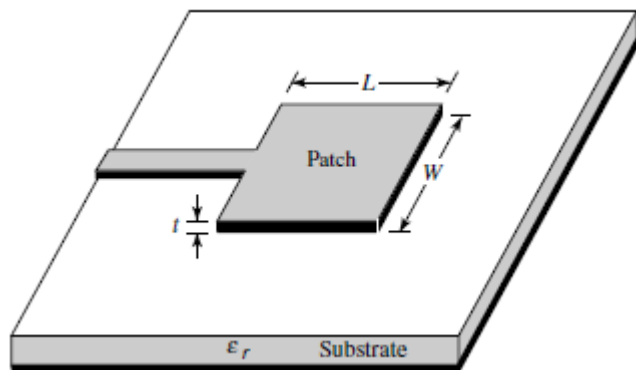
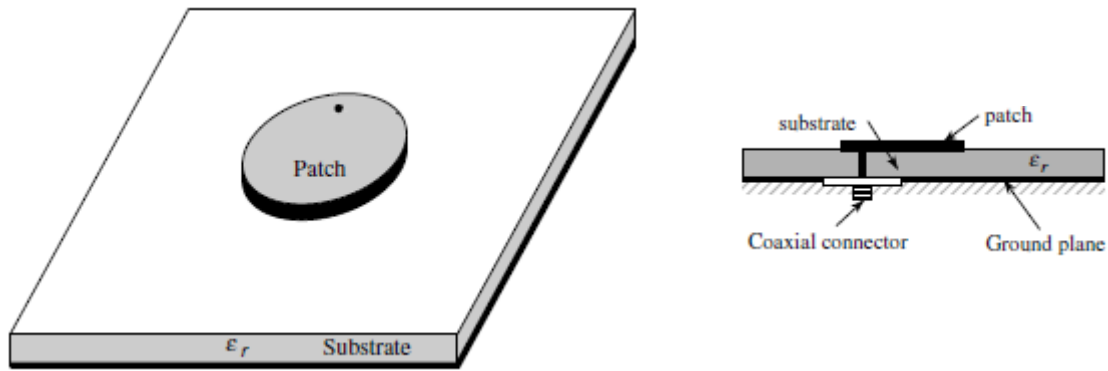


Figura 2-4: Parche con alimentación por línea microstrip [5]

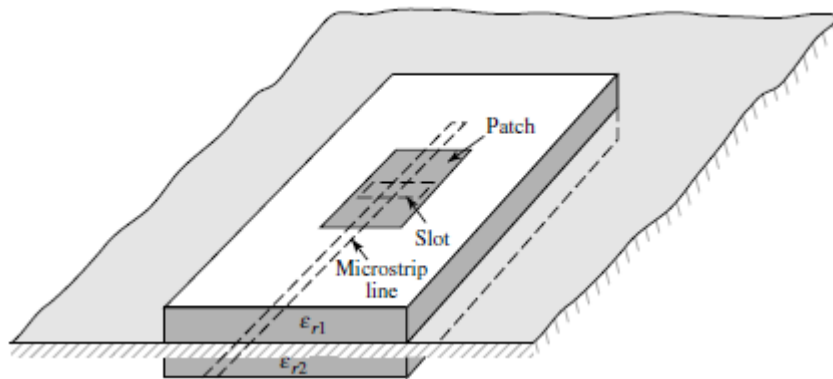
- Sonda coaxial: por el contrario, si queremos alimentar otro tipo de antena que no tiene por qué ser necesariamente un parche, podemos hacerlo mediante este método. Este nos garantiza que se elimina la radiación espuria que teníamos en el apartado anterior, aunque por otro lado se produce una disminución del ancho de banda y además tendremos que soldarla a la antena. En la Figura 2-5: a) Alzado de parche circular con alimentación por sonda coaxial y b) Vista lateral de parche circular con alimentación por sonda coaxial podemos observar un parche circular el cual está alimentado mediante la sonda coaxial a la que hacemos referencia, que viene representada en la figura como un punto dentro de este parche.



**Figura 2-5: a) Alzado de parche circular con alimentación por sonda coaxial y b) Vista lateral de parche circular con alimentación por sonda coaxial [5]**

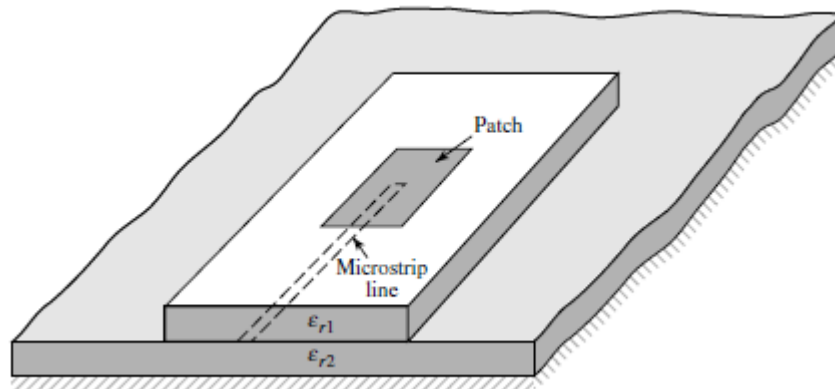
Por otro lado, también podemos alimentar un array sin necesidad de que exista contacto entre la propia antena y dicha alimentación. Estas técnicas son:

- Acoplo por apertura: es la más difícil de implementar, además tiene un ancho de banda estrecho. Consiste en dos sustratos con un plano de masa de por medio, con una línea microstrip debajo del sustrato inferior. Esta provee al inferior de energía que es comunicada al superior a través de un espacio de dicho plano de masa. Esto provoca que ambos casos sean independientes y por tanto si queremos hacer una optimización de la alimentación, podremos trabajar con cada uno de los sustratos como si el otro no estuviera presente.



**Figura 2-6: Parche con alimentación de acoplo por apertura [5]**

- Acoplo por proximidad: a diferencia del anterior caso, esta no tiene plano de masa entre los sustratos. Además, alcanza un gran ancho de banda y desaparece la radiación espuria [4].



**Figura 2-7: Parche con alimentación de acoplamiento por proximidad [5]**

Habiendo visto lo anterior, un array de antenas lo podemos alimentar utilizando una red de alimentación pasiva. Esta consiste en una serie de guías de onda que son colocadas en serie, paralelo o de forma mixta (serie y paralelo al mismo tiempo) que llevan la energía hasta los distintos elementos que forman el array. En nuestro caso, al ser el array de antenas planar, vamos a necesitar una red de alimentación mixta, en la cual las distintas líneas van a hacer que haya la misma amplitud en cada uno de dichos elementos, pero la fase de ellos va a cambiar, porque es lo que hará que el array apunte a un lugar u otro, como veremos en el anexo B. Herramienta de cálculo.



**Figura 2-8: Red de alimentación tipo mixta [2]**

### 2.1.6 Margen visible.

Otro de los conceptos más destacado dentro de esta agrupación de antenas, es el de margen visible. Este es la cantidad de ángulos que toma la variable eléctrica  $\Psi$  y que dan lugar a direcciones del espacio real tridimensional. Por ejemplo, en el mismo array anterior en el que los elementos estaban situados a lo largo del eje z, la variable  $\Psi$  viene dada por la fórmula (2.5)

$$\psi = k_0 \cdot d \cdot \cos\theta + \alpha \quad (2.5)$$

El margen visible es de suma importancia, porque como veremos en la sección 5.2.2 Distribución de los elementos, si vamos aumentando dicho margen visible, podemos ver que vamos a tener cada vez más lóbulos hasta que llegue un momento en el que se incluya la réplica del lóbulo principal, lo cual no es lo deseado.

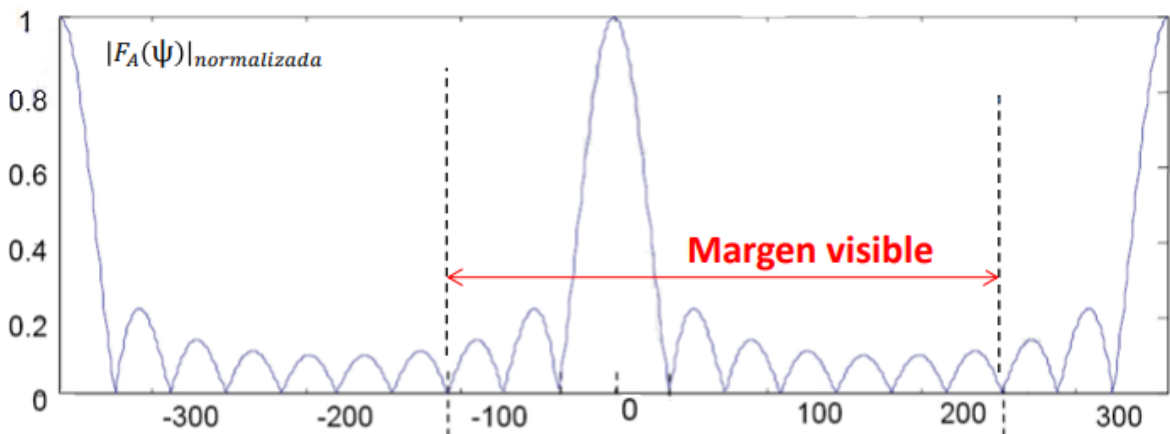
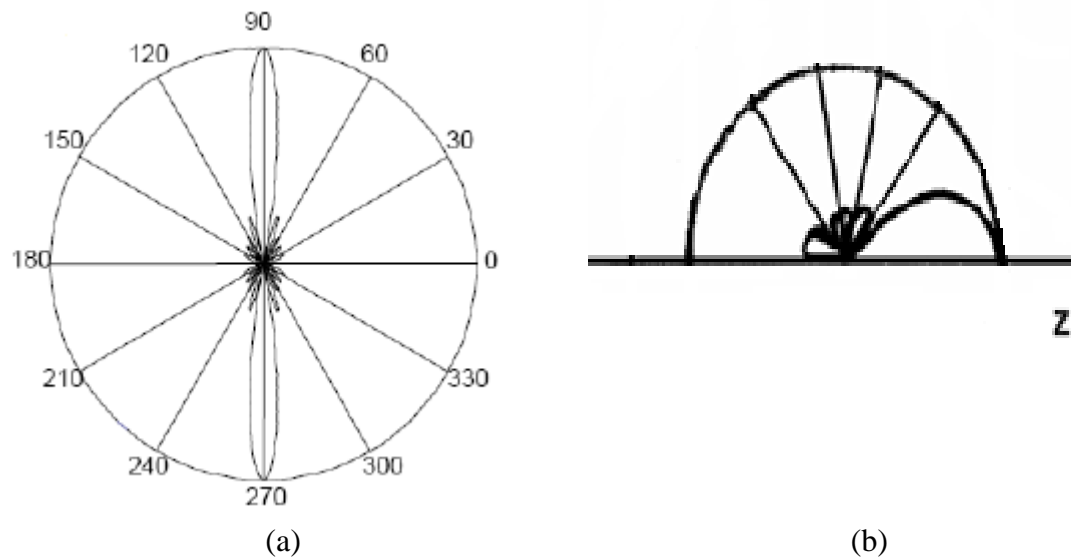


Figura 2-9: Margen visible [2]

### 2.1.7 Broadside y Endfire.

Por último, hay dos tipos particulares de alimentación que nos dan un diagrama de radiación muy particular. Estos, son el caso del array Broadside y el Endfire.

El primero de ellos, Broadside, se consigue alimentando el array de forma que el desfase progresivo entre sus elementos sea nulo, es decir:  $\alpha = 0$ . Por otro lado, el Endfire, lo vamos a conseguir cuando lo alimentemos con un desfase progresivo de:  $\alpha = -k \cdot d$ . El resultado de ambos diagramas, lo podemos ver en la Figura 2-10: Ejemplo de Factor de Array: a) Array de exploración Broadside, y b) Array de exploración Endfire. .



**Figura 2-10: Ejemplo de Factor de Array: a) Array de exploración Broadside, y b) Array de exploración Enfire. [2]**

## 2.2 GNSS

Las siglas GNSS corresponden a “Global Navigation Satellite System”. GNSS es un sistema de navegación basado en satélites los cuales emiten a distintas radiofrecuencias y que proporcionan una cobertura la cual no se ve influida de la atmósfera o del clima que haga donde se encuentra la otra antena en la superficie terrestre. Estos satélites se caracterizan por ser geoestacionarios y pueden dar cavidad a gran cantidad de usuarios, ya que tienen un amplio rango de cobertura.

La estructura de la señal de GNSS puede ser expresada como una secuencia genérica directa que es transmitida síncronamente por todos los satélites de la constelación. Estas señales transmitidas, viajan desde dichos satélites, cabe destacar que son MEO (Medium Earth Orbit), hasta el receptor que se encuentra en la Tierra. Antes de llegar a este, dicha onda atraviesa la atmósfera, lo cual provoca que se genere un canal de radio-propagación, el cual cambia la fase, amplitud y el retardo en ella [1].

## 3 Caso de estudio

### 3.1 Requisitos de sistema y especificaciones del diseño

Nuestro array debe cumplir una serie de requisitos para que funcione de manera óptima. Uno de ellos es que tiene que prestar servicio a todas las bandas en las que trabaja GNSS, para ello la respuesta en todas ellas debe de ser buena. Otro de los requisitos es que la polarización sea circular a derechas (RHCP), aunque esto viene implícito en nuestro elemento radiante como veremos en la sección 5.2.1 Elemento radiante.

**Tabla 3.1: Frecuencias de trabajo de los distintos sistemas de GNSS [5]**

Parámetros	Unidades	Valores
Tipo de polarización	-	RHCP
Frecuencia central	GHz	1.4
Ancho de banda	GHz	1.15 – 1.65
Señales de GNSS	-	L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6
Impedancia conectores	$\Omega$	50

Como podemos ver en la Tabla 3.1: Frecuencias de trabajo de los distintos sistemas de GNSS, nuestro sistema debe trabajar con óptimas prestaciones para todas las bandas de GNSS alocadas entre 1.15 GHz y 1.65 GHz. Además, como hemos comentado al comienzo de este apartado, la polarización debe de ser RHCP, debido a que la mayoría de las comunicaciones satelitales utilizan este tipo de polarización.

### 3.2 Parámetros importantes para el análisis del diseño

Los parámetros importantes de estos diseños vienen dados por como evaluamos si un sistema está funcionando correctamente o no. Todo esto lo veremos más detallado en la sección de 6. Análisis de los resultados.

#### 3.2.1 Diagrama de radiación

Principalmente, las prestaciones de los elementos la vamos a comprobar en su diagrama de radiación. Este lo obtendremos por medio de simulaciones del array, y en él vamos a poder ver si apunta a la dirección que deseamos, aunque antes de eso veremos con una simulación de dicho array sin pesos qué es lo que sucede con las ganancias a la hora de aumentar el número de elementos.

#### 3.2.2 Pesos de cada uno de los elementos del array

Otro de los parámetros a tener en cuenta es el desfase que vamos a poner a cada puerto de cada elemento del array, ya que es el fundamental para que el array de antenas funcione como queremos.

Los distintos pesos los calculamos a través de un script de Matlab® y son los que tenemos que implementar en cada uno de los puertos de los elementos que conforman el array. Todo esto viene detallado en el anexo A. Herramienta de diseño. Dichos pesos en realidad es el desfase que tendría que establecer la red de alimentación a cada uno de los pesos, esto lo hemos visto en el apartado 2.1.5 Tipo de alimentación.

Por tanto, una vez que hemos obtenido estos desfases, simplemente se los tenemos que sumar o restar (dependiendo de si el desfase es positivo o negativo). Con esto lo que logramos es, a la polarización circular a derechas que tiene el elemento radiante del que partimos, lo que veremos en la sección 5.2.1 Elemento radiante, modificarla para conseguir alcanzar este apuntamiento

## **4 Revisión de las herramientas del diseño**

---

### **4.1 CST**

El diseño de los elementos de los arrays ha sido generado en la herramienta “Computer Simulation Technology” (CST). El funcionamiento y características de la misma lo podemos ver en el anexo A. Herramienta de diseño.

### **4.2 Matlab®**

El cálculo de los pesos que tenemos que implementar en los puertos de los distintos elementos de nuestro array lo hemos con un script desarrollado en Matlab®. La explicación de cómo funciona la herramienta y todo este procedimiento para el cálculo de los pesos, lo podemos ver en detalle en el anexo B. Herramienta de cálculo.

## **5 Simulación de array de antenas**

---

### **5.1 Selección de geometría**

Para la selección del diseño, hemos hecho un estudio considerando algunas posibles alternativas de las formas y distribución que podía adoptar nuestro array basándonos en los trabajos previos presentados en [6]. En un primer lugar, se podría haber hecho un estudio de los arrays lineales, pero a diferencia de estos, los arrays planares pueden apuntar a cualquier dirección de los dos ejes en los que se sitúe. Otra geometría de las que hemos visto en la sección 2 es la conformada, pero debido a que estos arrays son demasiado complejos y están fuera del alcance de los objetivos de este trabajo, hemos decidido que la forma más apropiada para el estudio de este trabajo eran los arrays planos.

En cuanto al número de elementos, hemos optado por 2 (lineal), 4 (2x2) y 16 (4x4) elementos. Además, el principal objeto de estudio en este trabajo es el apuntamiento de un array a una dirección dada, y esto lo podemos conseguir con este número de elementos sin problema, y no es necesario aumentar hasta un número mayor, aunque si cuando se pretenda evaluar la relación señal interferencia o se especifique un valor mínimo de la misma bajo unas características específicas de la señal interferente.

### **5.2 Descripción de los componentes de del array seleccionado y su distribución**

Una vez escogida la forma del array, tenemos que elegir el elemento radiante y establecer donde situar los elementos, las distancias y la forma de alimentar cada uno de ellos. Cabe destacar que los elementos del array van a ser idénticos y que van a ser réplicas exactas del elemento radiante que veremos a continuación.



### 5.2.1 Elemento radiante

Para comenzar la gestión de este trabajo, partimos de un elemento radiante el cual ya estaba confeccionado y que, gracias a sus propiedades, es apto para los sistemas GNSS que es sobre los que trata este trabajo. Las características

En primer lugar, el elemento radiante está formado por distintos componentes que podemos ver en él. Tiene una forma cilíndrica, como podemos ver en la Figura 5-1. Este elemento fue elegido con esta forma circular debido a que cumple mejor con las especificaciones requeridas [5] y además va a ser alimentado con una sonda coaxial como las que hemos visto en el apartado 2.1.5 Tipo de alimentación. Las partes de dicho elemento son: parche activo, parche apilado, dipolos y luego se encontraría la parte de la alimentación. El parche activo es un parche circular que está situado sobre un plano de masa con una capa de espuma (Foam). El parche apilado sirve para poder optimizar la respuesta del parámetro S11. Los dipolos tienen como finalidad generar esas adaptaciones que podemos ver en formas de picos en el parámetro S11. La alimentación se hace a partir de cuatro sondas coaxiales por medio de un conector SMA, que va a ser el encargado de lograr la polarización circular a derechas que se ve en las características del elemento.

Posteriormente, una vez ya realizado el elemento con la forma deseada, que en nuestro caso utilizamos un elemento radiante ya diseñado anteriormente [5], y las partes que hemos enumerado, podemos ver que está desfasado  $90^\circ$  uno de los puertos con respecto al otro que se encuentra justo después para lograr una polarización circular a derechas (RHCP). Si nos fijamos en la Figura 5-2 podemos ver los cuatro puertos pintados de rojo, siendo el primero el que se encuentra a la izquierda de la imagen, y luego va aumentando el número según el sentido de las agujas del reloj. El desfase que vemos que se ha introducido en las propiedades de los puertos es, en el primero el cual vamos a tomar como referencia,  $0^\circ$  debido a que es el inicial y sobre el que vamos a desfasar los siguientes. El segundo puerto (que sería el que está arriba en la figura que hemos indicado anteriormente), vemos que el desfase es de  $90^\circ$ , que corresponde con el que hemos indicado. En el tercero, el desfase es  $180^\circ$ , porque tiene que ser  $90^\circ$  en relación con el anterior. Por último, el cuarto tiene que tener un desfase de  $270^\circ$ , por el mismo motivo que antes, y así poder generar la polarización circular.

Para finalizar, la amplitud con la que está alimentado cada puerto podemos ver que es  $\frac{1}{4}$ , lo cual tiene sentido, ya que vamos a repartir la potencia de la onda incidente entre los 4 puertos, para que todos estén alimentados de manera uniforme. De esta forma, podemos empezar a simular para ver si efectivamente tenemos la respuesta deseada.

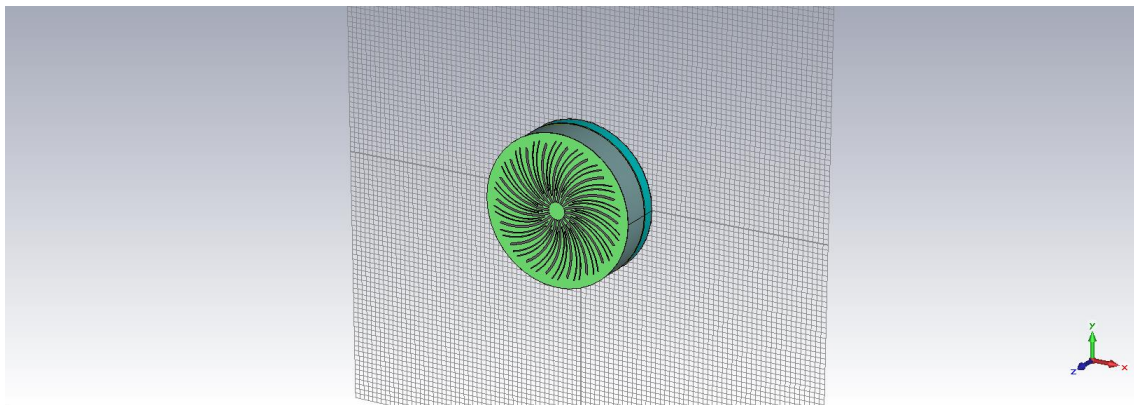
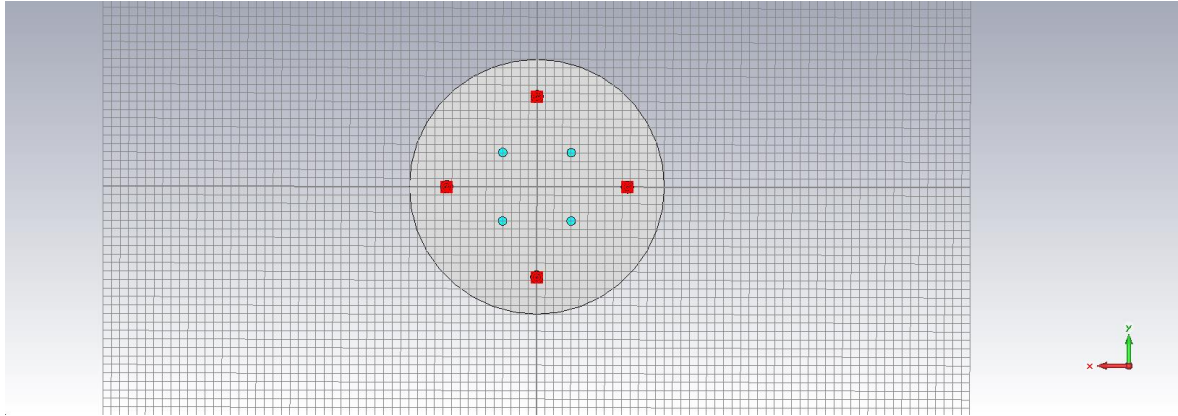
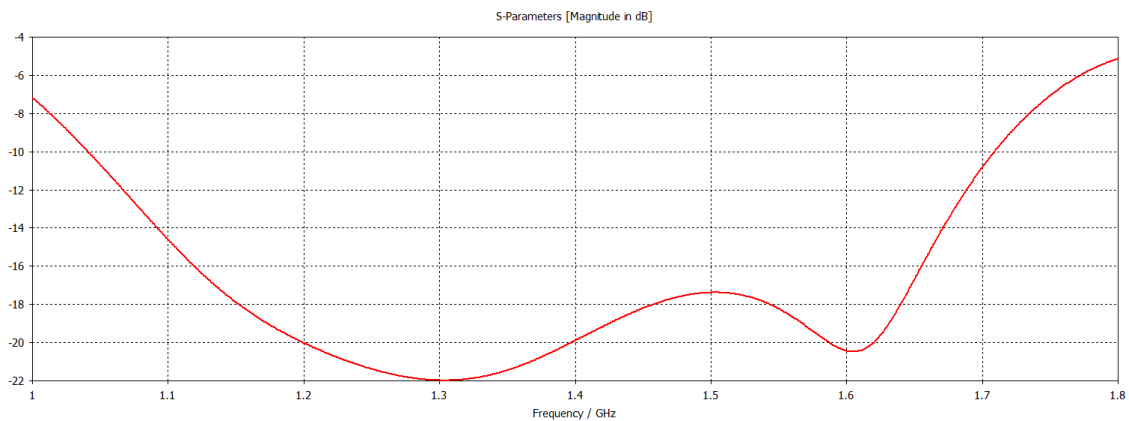


Figura 5-1: Elemento radiante [7]



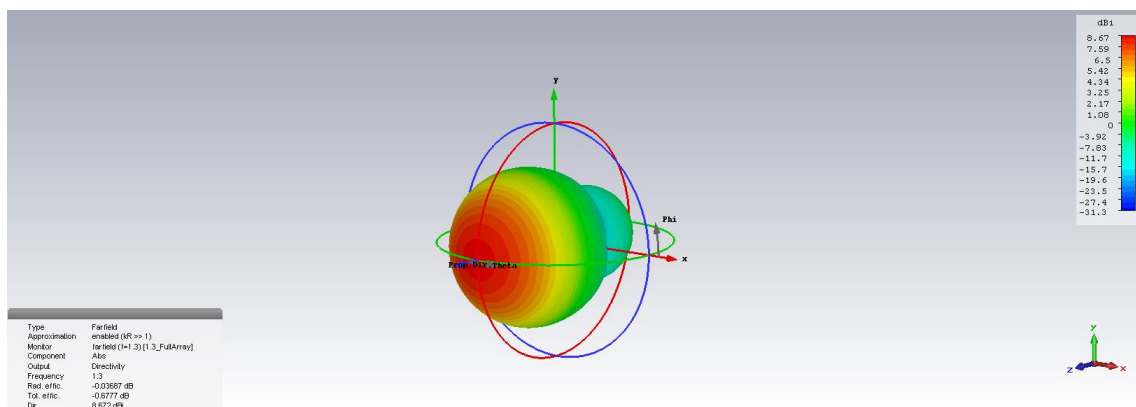
**Figura 5-2: Puertos del elemento radiante [7]**

Una vez acabada la simulación, el elemento tiene buenas prestaciones en toda la banda de GNSS, obteniendo una adaptación mejor a -18 dB para toda ella, como se muestra en la Figura 5-3: Parámetro S11 del elemento radiante.

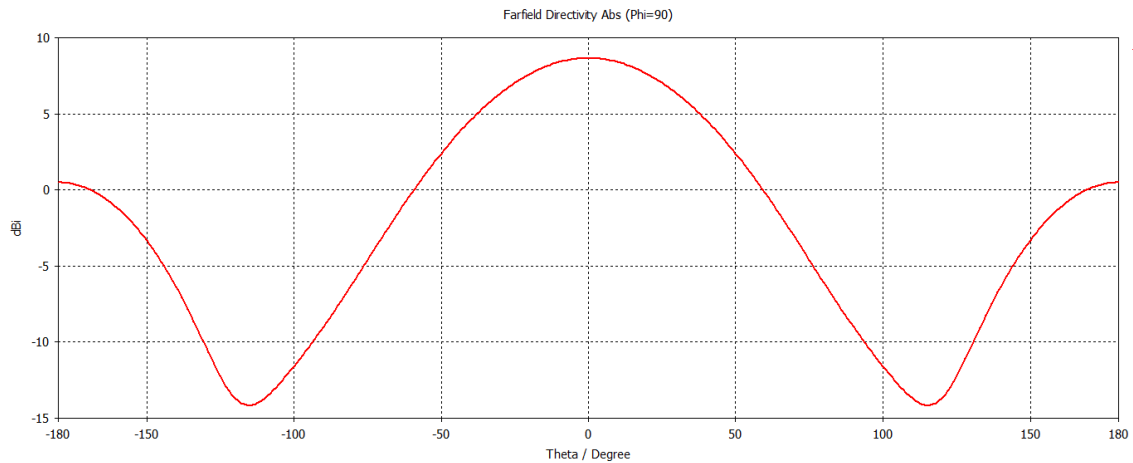


**Figura 5-3: Parámetro S11 del elemento radiante**

El “Farfield” en 1.3 GHz que obtenemos como resultado del elemento radiante el que podemos ver en la Figura 5-4: Farfield 3D a 1.3 GHz del elemento radiante, el cual vemos que tiene un lóbulo principal apuntando a  $\theta = 0^\circ$  y  $\Phi = 0^\circ$ . Por tanto, en la representación en cartesianas de la Figura 5-5: Farfield en cartesianas a 1.3 GHz del elemento radiante podemos observar que, efectivamente, en  $\theta = 0^\circ$  tenemos el valor máximo de radiación de 8.67 dBi (directividad).

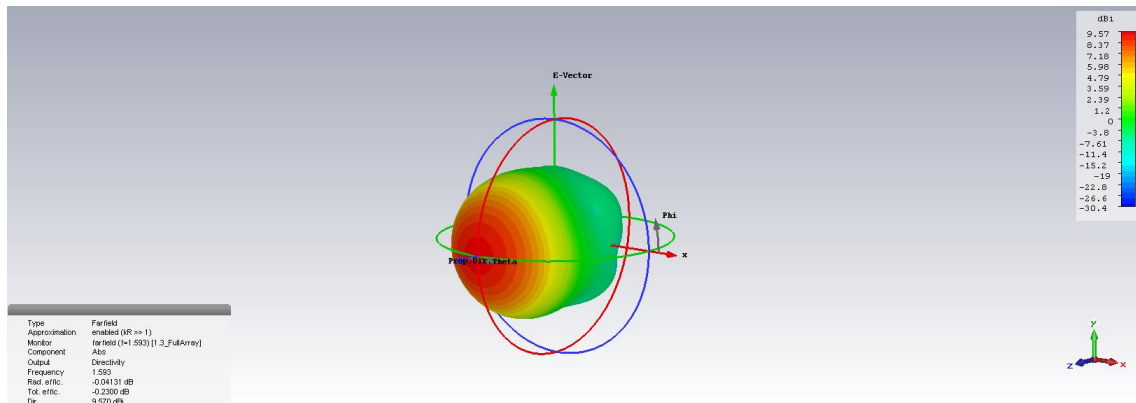


**Figura 5-4: Farfield 3D a 1.3 GHz del elemento radiante**

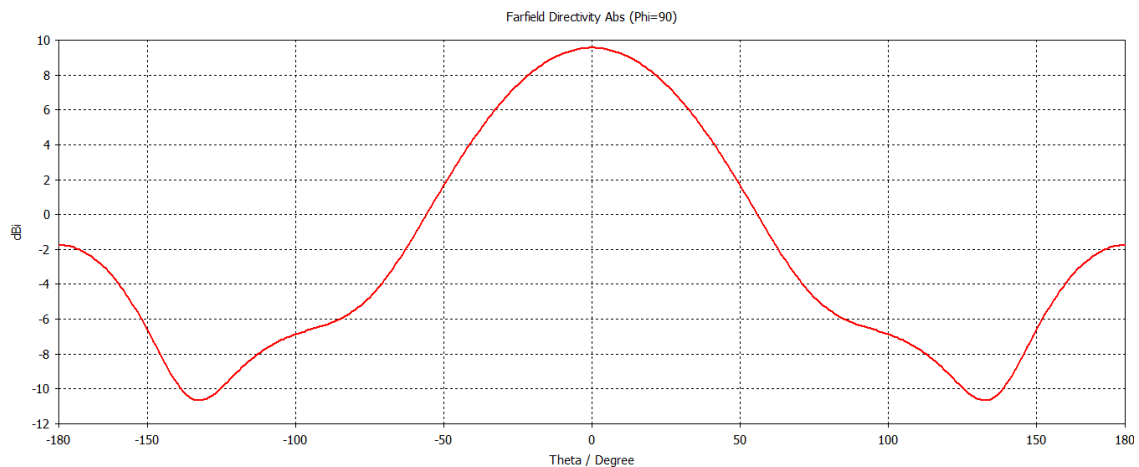


**Figura 5-5: Farfield en cartesianas a 1.3 GHz del elemento radiante**

Por otro lado, en la frecuencia de 1.6 GHz, podemos ver que es semejante al apartado anterior, lo único que cambia es la forma de la representación 3D que se ve reflejada con más detalle en la Figura 5-7: Farfield en cartesianas a 1.6 GHz del elemento radiante, donde podemos observar que la respuesta no es tan plana, pero a efectos de radiación seguimos teniendo un máximo principal en  $\theta = 0^\circ$  con un valor un poco mayor al caso anterior que es de 9.57 dBi. Este aumento de directividad está relacionado con la frecuencia de evaluación.



**Figura 5-6: Farfield 3D a 1.6 GHz del elemento radiante**



**Figura 5-7: Farfield en cartesianas a 1.6 GHz del elemento radiante**

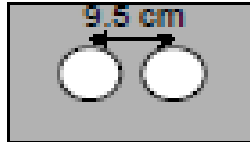
### 5.2.2 Distribución de los elementos

En primer lugar, se ha decidido colocar uno de los elementos sobre el origen del eje de coordenadas y los demás a su alrededor. Esto no tiene ningún tipo de repercusión en los resultados que vamos a obtener en las simulaciones, simplemente se hace por simplicidad a la hora de representar en la herramienta de CST.

A la hora de introducir dichos componentes, hay que tener en cuenta el número de elementos que vamos a estudiar. En el caso de 2 no habría problema, ya que simplemente es un elemento al lado del otro, pero en el caso de 4 y 16, lo que queremos es que guarden simetría y que estén a la distancia correcta.

Para el cálculo de las distancias, hemos hecho un estudio para determinar cuál era la correcta, ya que, si ponemos una distancia “d” muy pequeña, no vamos a poder ver bien los lóbulos secundarios y, por tanto, no vamos a poder determinar con exactitud si nuestro sistema trabaja de la forma deseada o no. Por el contrario, si ponemos un valor de “d” muy alto, el problema va a ser justo al contrario, es decir, que vamos a ver demasiados lóbulos y, además, nuestro lóbulo principal va a superponerse, ya que en  $360^\circ$  o en el simétrico que es en  $-360^\circ$  apareciendo antes lóbulos de difracción. Cabe destacar que, dependiendo del sistema, vamos a necesitar una configuración u otra, pero en nuestro caso en concreto, podemos establecer una configuración inicial y simular para poder ver los resultados.

El caso óptimo, es colocar los elementos entre sí a una distancia de 9.5 cm como muestra la Figura 5-8: Separación entre elementos de un array , lo cual corresponde con un valor en proporciones de longitudes de onda de:  $0.4324\lambda$ .



**Figura 5-8: Separación entre elementos de un array [8]**

Se ha considerado la frecuencia central de trabajo para el cálculo de la distancia entre elementos. En este caso y ya establecida la distancia, lo que nos queda es implementarlo en la herramienta para después simularlo.

**Tabla 5.1: Frecuencias de trabajo de los distintos sistemas de GNSS**

Signals	Freqs. [GHz]			Nav. Syst.
	ini	central	end	
L1	1,563	1,575	1,587	GPS
L1	1,593	1,602	1,61	GLONASS
L2	1,216	1,228	1,24	GPS
L2	1,24	1,247	1,254	GLONASS
L5	1,164	1,176	1,188	GPS
E1	1,587	1,59	1,593	GALILEO
E2	1,559	1,561	1,563	GALILEO
E3	1,214	1,215	1,216	GALILEO
E4	1,254	1,257	1,26	GALILEO
E5	1,19	1,202	1,214	GALILEO

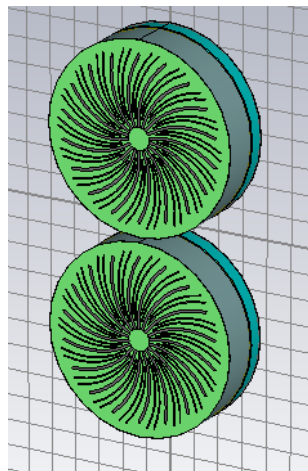
Lamentablemente, la relación de distancia para el elemento utilizado de banda ancha (36% de banda), es inferior a las dimensiones en sí de dicho elemento. Esto ha hecho que separemos el elemento con una distancia entre centros de fase de  $7 \lambda$ . La solución para futuros casos de estudio es aumentar el retardo de grupo de la onda que se propaga entre los elementos mediante la implementación de planos de masa formados por estructuras EBG.

### ***5.3 Descripción de la implementación de diseño inicial en CST. Diagrama de flujo de la metodología.***

El diseño inicial está implementado con las características del apartado 5.2.2 Distribución de los elementos. En él, dejamos establecida la distancia de los elementos y podemos empezar a analizar nuestro array, y de todos los casos (2,4 y 16) nuestro primer punto de partida va a ser el de 2 elementos.

Para empezar a realizarlo, cogimos el elemento radiante de la sección 5.2.1 Elemento radiante y lo replicamos hasta que tuvimos el número que quisimos. Para lograr hacerlo, utilizamos una aplicación de la herramienta CST (todo esto viene detallado en el Anexo A). Este “Wizard” tiene la opción de elegir el número de filas y columnas (como muestra la Figura 0-4: CST Array Wizard). En este caso nuestro número de filas fue 2 y el número de columnas 1. Dicho “Wizard” también necesita que le aportemos las distancias que tienen los elementos entre sí, que se corresponden con la que hemos obtenido en el apartado anterior (Distribución de los elementos). En este caso en concreto, no tuvimos que establecer la distancia en el eje “x” ya que no tenemos elementos al lado derecho o izquierdo, en el eje “y” simplemente tuvimos que poner 153.82 cm, que se corresponde con la distancia deseada. El array quedó como representa la Figura 5-9: Array de 2 elementos.

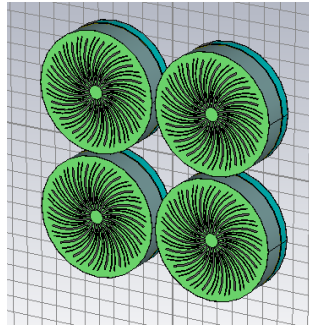
El siguiente paso fue la simulación del sistema para saber su comportamiento, lo cual se verá en la sección 6. Análisis de los resultados.



**Figura 5-9: Array de 2 elementos**

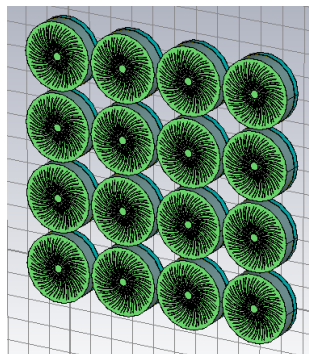
El siguiente caso de estudio fue el array de 4 elementos, en el cual tuvimos que cambiar los parámetros del “Wizard” anterior para poder hacerlo. En este, cambiamos el número de columnas a 2 y el de filas a 2 también para tener los 4 elementos deseados. Las distancias en este caso también sufrieron actualizaciones, pero solamente en el eje x, ya que en el eje y siguen siendo las mismas.

La diferencia que hay entre este caso y el de 2 elementos, es que en este sí que hay elementos a los lados izquierdo y derecho y, por tanto, hay que poner una distancia. La distancia que pusimos fue la misma que en el eje y, ya que queremos que en ambos ejes los elementos estén a la misma distancia. Una vez que tuvimos claros los datos que había que aportar, el sistema quedó como muestra la Figura 5-10: Array de 4 elementos.



**Figura 5-10: Array de 4 elementos**

Por último, el caso que nos queda es el de 16 elementos, el cual es bastante parecido al anterior, ya que la única diferencia que hay entre ambos es el número de elementos, ya que las distancias en ambos ejes son las mismas. En este apartado, solamente tuvimos que cambiar el número de filas a 4 y el número de columnas a 4 también, para que sumen en total 16 elementos. Una vez que finalizó el diseño, el array quedó como muestra la Figura 5-11: Array de 16 elementos.



**Figura 5-11: Array de 16 elementos**

Como podemos observar, todos los casos están orientados hacia el eje z.

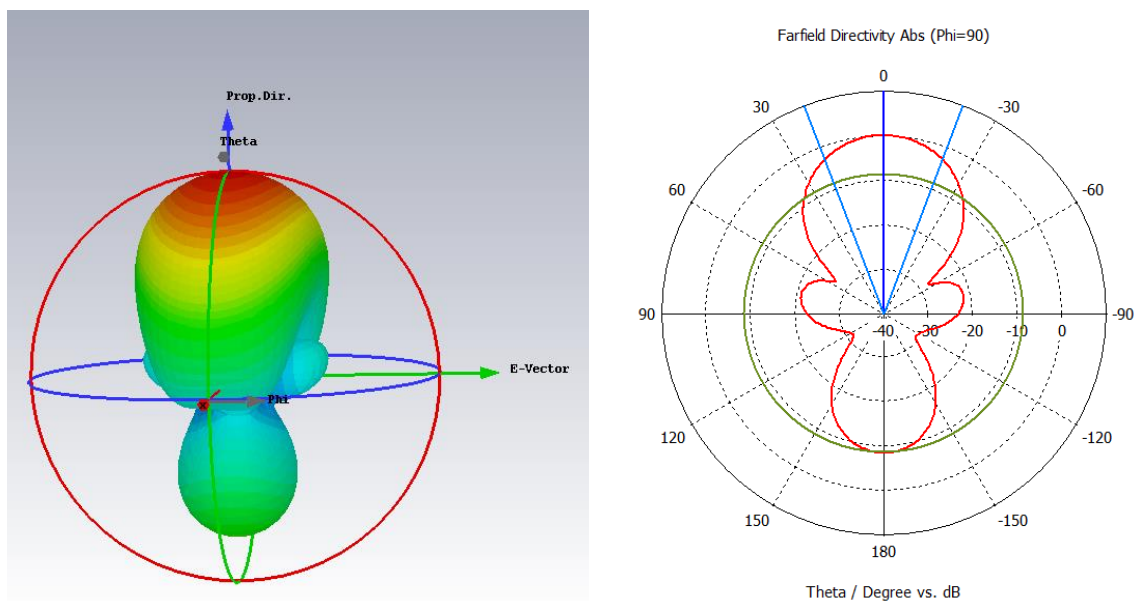


## 6 Análisis de los resultados

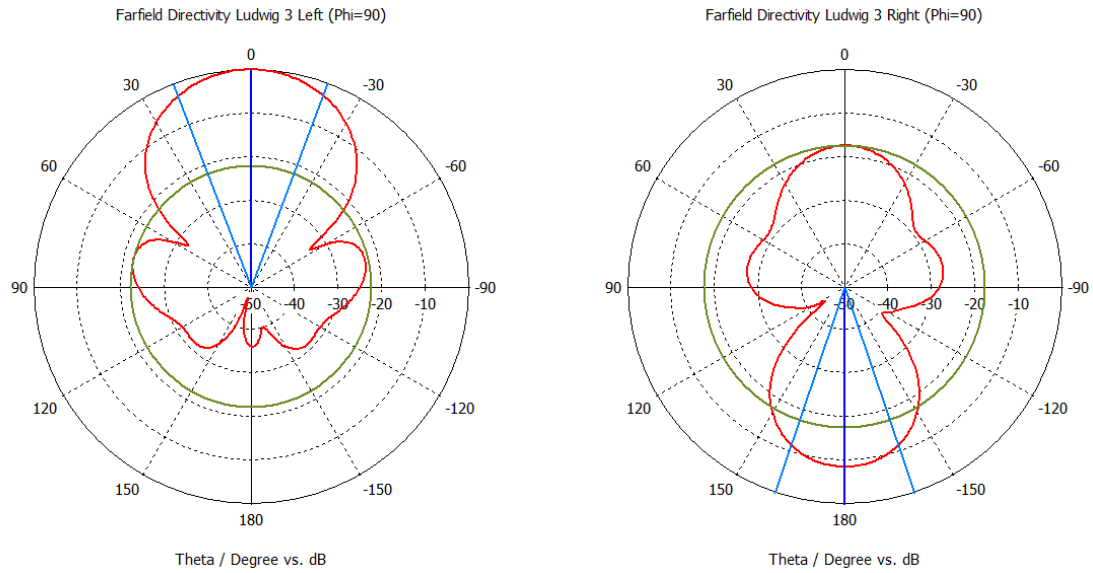
Una vez realizados los arrays de estudio del trabajo, ya teníamos la posibilidad de simularlos y comparar los resultados que íbamos obteniendo a medida que acababan estas. A priori, lo que podemos establecer es que la ganancia que vamos a conseguir es más elevada en cuanto mayor sea el número de elementos, como hemos visto en el punto 1. Introducción, por tanto, el array de 16 elementos suponemos que va a tener una mayor, mientras que el de menor va a ser el de 2 elementos.

Al principio, hicimos una simulación con una excitación en los puertos semejante (“All ports”), para ver el comportamiento y comprobar las ganancias. Para hacer esta, simplemente tuvimos que seleccionar en el menú de la Figura 0-2: Menú Simulation de CST y marcar la opción “Setup Solver”. Por defecto, el programa tiene marcada la opción anteriormente citada, por tanto, al entrar en el menú seleccionamos “Start” sin cambiar nada.

Al hacer esta simulación, los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 6-1: a) Radiación Array de 2 elementos y b) Farfield Polar Array de 2 elementos**

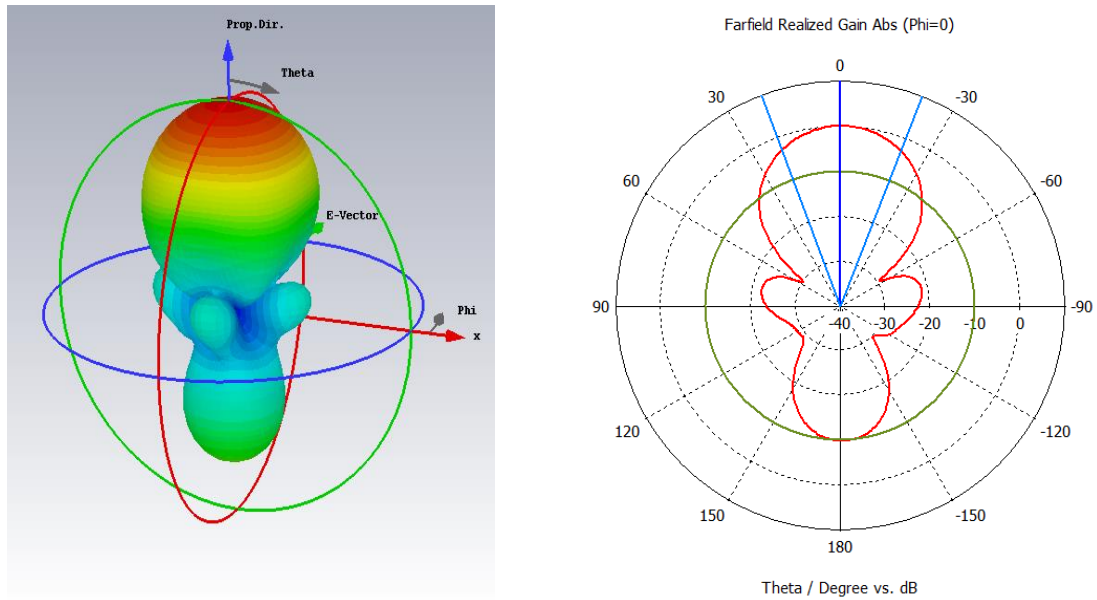


**Figura 6-2: a) Copolar Array de 2 elementos y b) Crosspolar Array de 2 elementos**

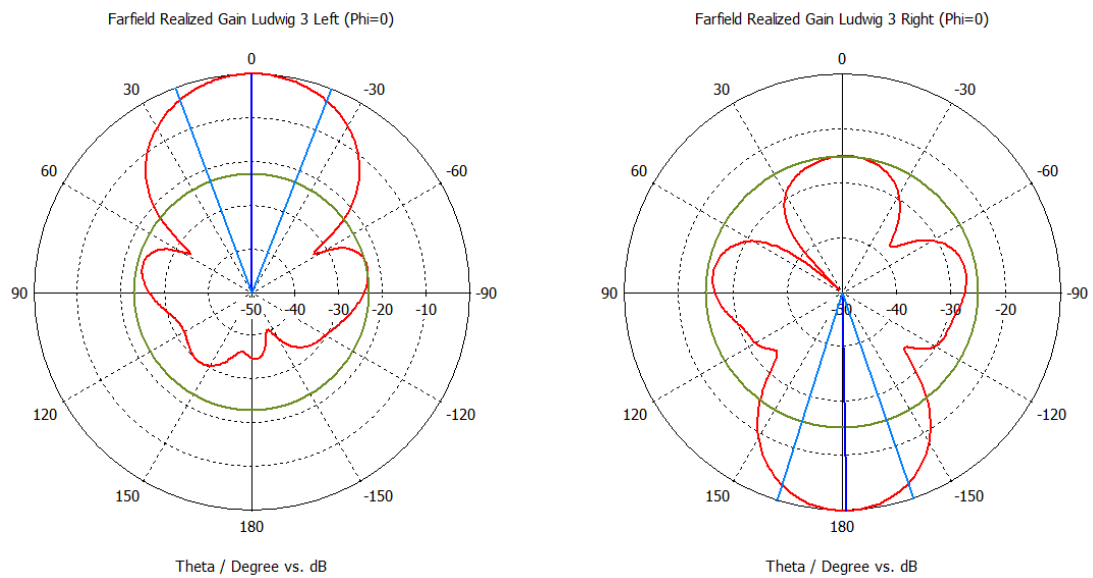
**Tabla 6.1: Ganancias de Array de Antenas de 2 elementos**

	<b>Ganancia (dB)</b>	<b>Directividad</b>	<b>Ancho de haz a -3 dB</b>
<b>Array 2 elementos</b>	9.68	10.33	41.346°





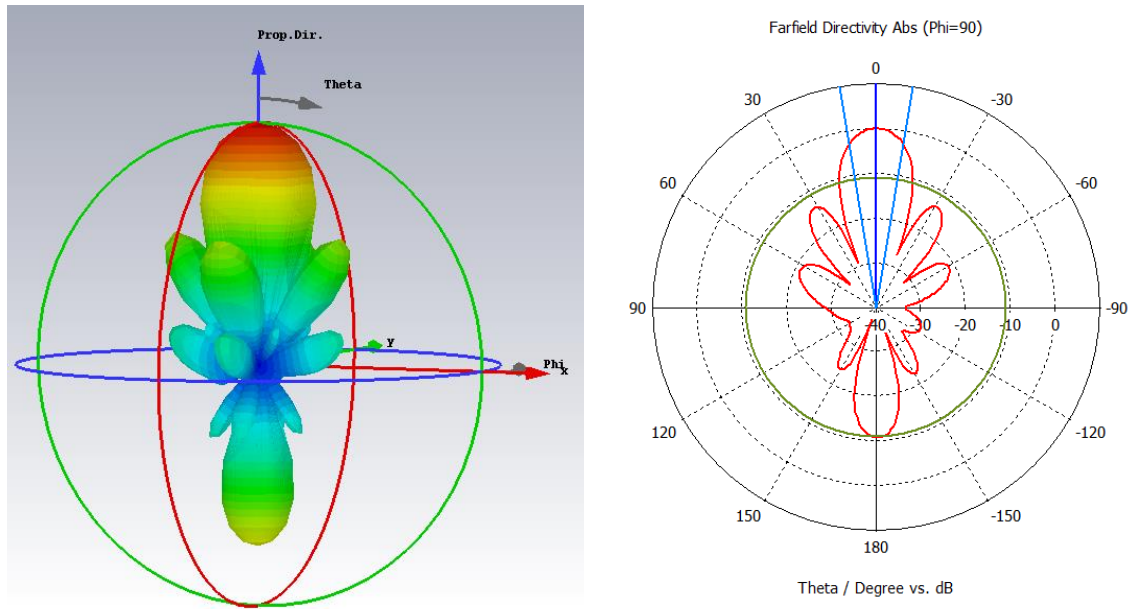
**Figura 6-3: a) Radiación Array de 4 elementos y b) Farfield Polar Array de 4 elementos**



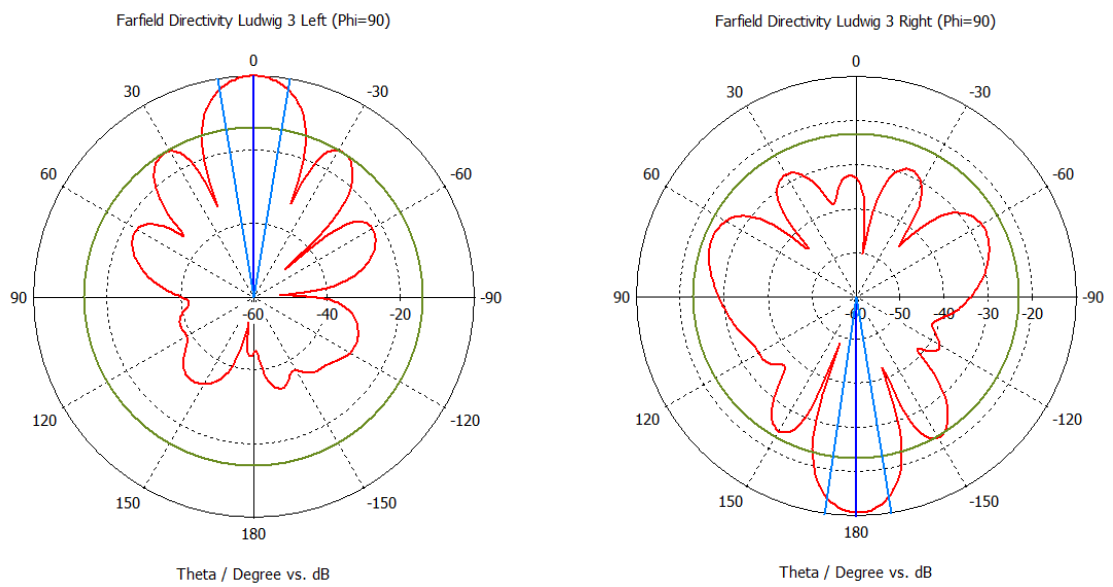
**Figura 6-4: a) Copolar Array de 4 elementos y b) Crosspolar Array de 4 elementos**

**Tabla 6.2: Ganancia, directividad y ancho de haz de Array de Antenas de 4 elementos**

	Ganancia (dB)	Directividad	Ancho de haz a -3 dB
Array 4 elementos	12.5	13 dB	42.143°



**Figura 6-5: a) Radiación Array de 16 elementos y b) Farfield Polar Array de 16 elementos**



**Figura 6-6: a) Copolar Array de 16 elementos y b) Crosspolar Array de 16 elementos**

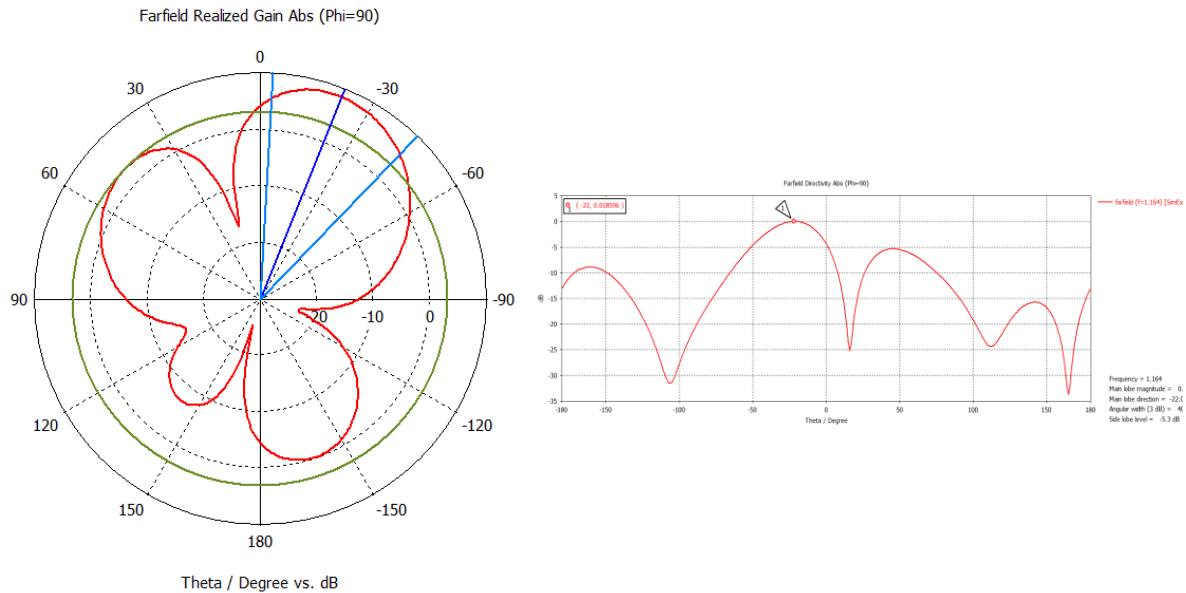
**Tabla 6.3: Ganancias de Array de Antenas de 16 elementos**

	<b>Ganancia (dB)</b>	<b>Directividad (dBi)</b>	<b>Ancho de haz a -3 dB</b>
<b>Array 16 elementos</b>	18.2	18.6	21.294°

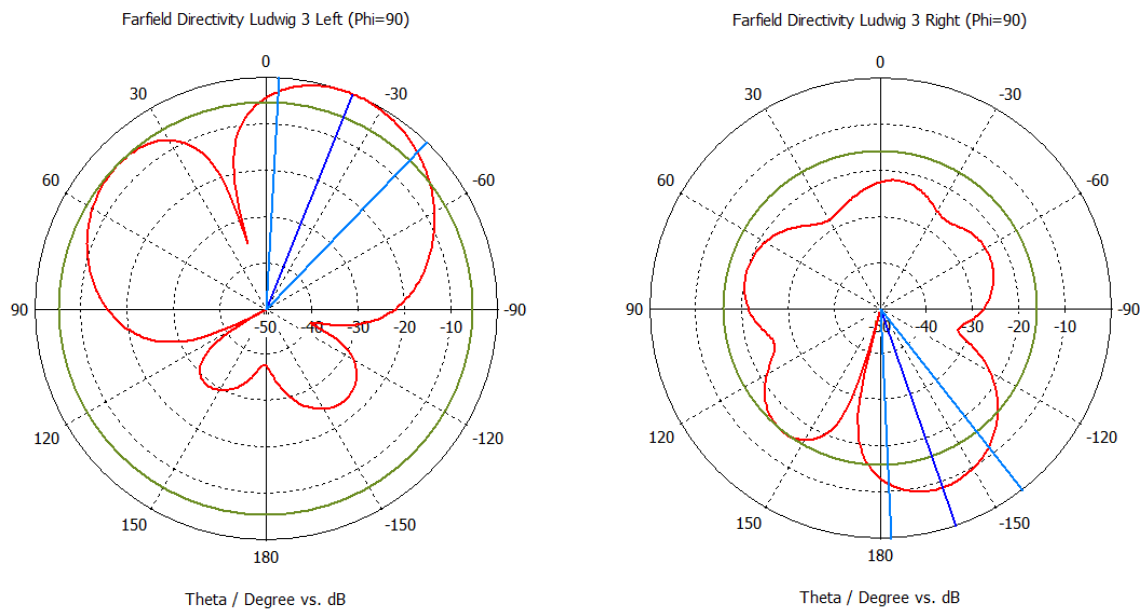
A la vista de los resultados, podemos decir que estábamos en lo cierto con respecto a las ganancias. Tomando como referencia las tablas, a medida que aumentamos el número de elementos del array, esta va aumentando con varios órdenes de magnitud, ya que con dos elementos comenzamos en torno a los 9 dB y cuando vamos aumentando logramos alcanzar casi los 19 dB. Esto es muy importante, ya que si queremos que nuestro sistema emita a una potencia más elevada o lo necesitamos, porque la SNR (“Signal Noise Ratio”) no puede descender de un valor mínimo, simplemente bastará con aumentar el número de elementos y lograremos cumplir las especificaciones que queramos o que nos digan. Con respecto a la directividad, nos sucede exactamente lo mismo, ya que aumenta a medida que el número de elementos crece. El ancho de haz lógicamente disminuye, ya que al aumentar el lóbulo principal conseguimos que sea más directivo pero asumiendo que el ancho va a disminuir.

Por otro lado, vamos al objetivo principal de este trabajo, que es el apuntamiento. Hasta ahora, simplemente nos hemos dedicado a explicar el proceso de cómo se logra esto, su implementación en la herramienta de CST y la obtención de los parámetros necesarios para conseguirlo, pero no hemos obtenido ningún resultado para corroborar que lo que estamos explicando es cierto, por tanto, hicimos la simulación de los arrays de 2, 4 y 16 elementos, y en este caso, vamos a ir explicando cada uno detalladamente.

El primero de ellos es el array de 2 elementos. Una vez introducidos los pesos que se explican en el Anexo: Herramienta de cálculo, podemos ver si logramos que apunte al ángulo dado. Cabe destacar que hasta ahora no hemos establecido donde vamos a apuntar. En este caso vamos a querer apuntar a la dirección que marca  $\theta = 30^\circ$ . Dejando este punto claro, ahora podemos ver qué resultados nos salieron en este caso.



**Figura 6-7: a) Farfield Polar Array con pesos de 2 elementos y b) Farfield Cartesianas Array de 2 elementos con pesos**

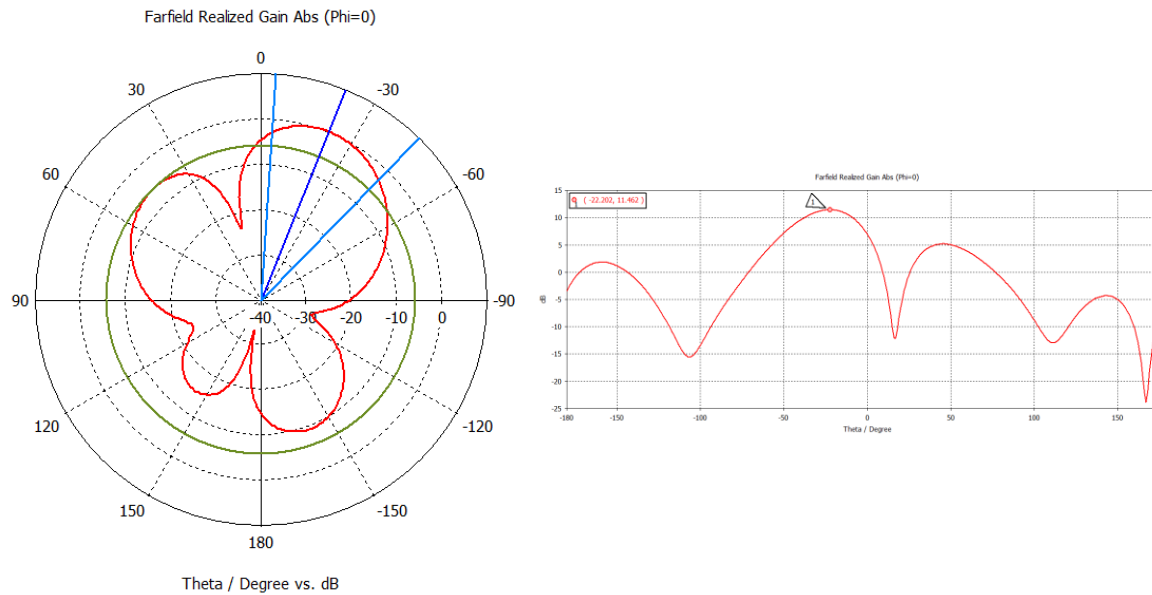


**Figura 6-8: a) Copolar Array con pesos de 2 elementos y b) Crosspolar Array de 2 elementos con pesos**

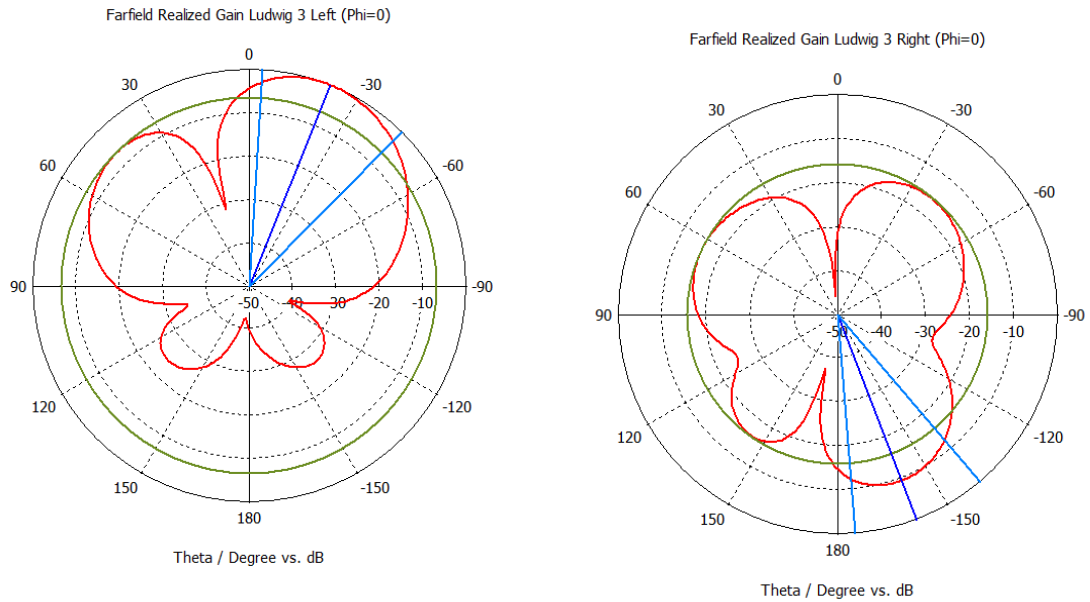
Viendo los resultados de la Figura 6-7: a) Farfield Polar Array con pesos de 2 elementos, podemos decir que hemos conseguido apuntar a la dirección que queríamos, ya que se ve claramente que el lóbulo principal se sitúa en torno a los 30° de  $\theta$ , aunque para verlo más nítidamente, podemos mirar a la Figura 6-9: a) Farfield Polar Array con pesos de 4 elementos y b) Farfield Cartesianas Array de 4 elementos con pesos, donde en coordenadas cartesianas podemos observar que queda más claro que estamos cerca de esa dirección.

Por tanto, para el array de 2 elementos podemos decir que hemos conseguido el objetivo que nos propusimos.

En segundo lugar tenemos el caso del array de 4 elementos. En este caso, al igual que en el anterior, podemos ver en la que el sistema logra apuntar a la dirección de  $30^\circ$  o muy próximo a este valor.

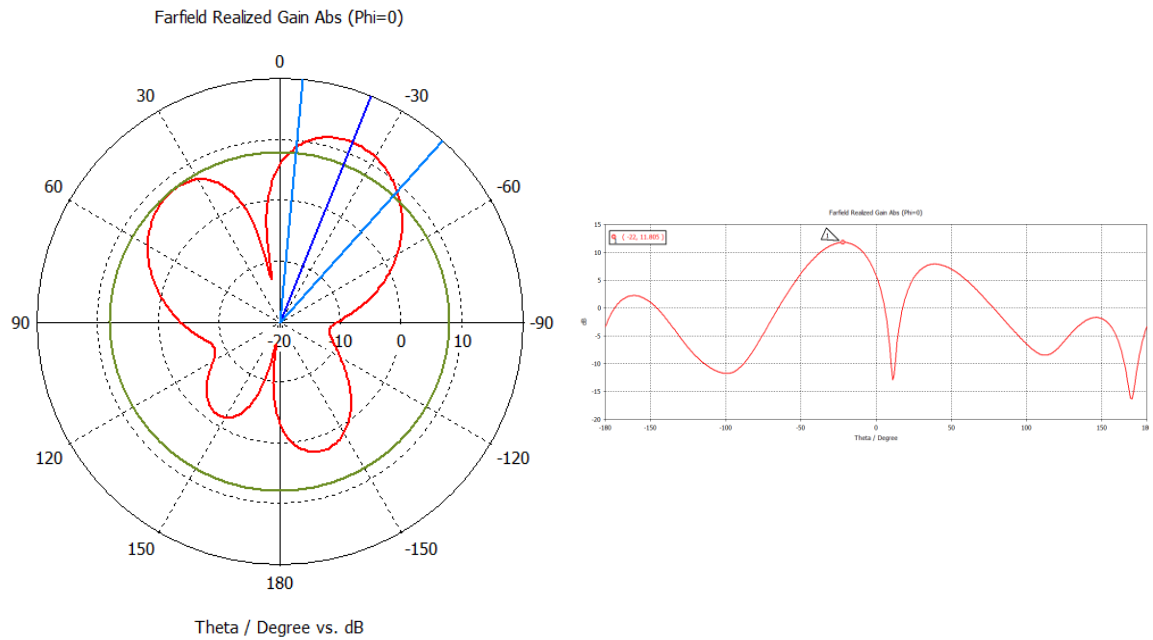


**Figura 6-9: a) Farfield Polar Array con pesos de 4 elementos y b) Farfield Cartesianas Array de 4 elementos con pesos**

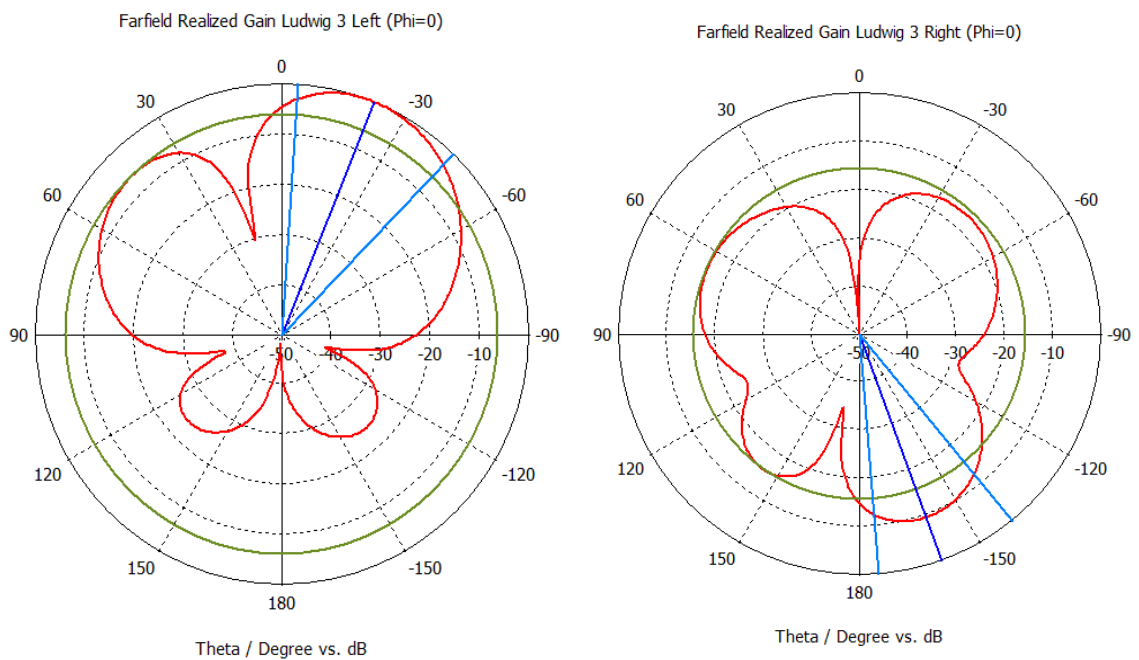


**Figura 6-10: a) Copolar Array con pesos de 4 elementos y b) Crosspolar Array de 4 elementos con pesos**

Por último, tenemos el caso de 16 elementos, en el cual podemos ver, al igual que en los casos anteriores, que el apuntar a una dirección se consigue y que además llegamos a una ganancia más alta, como muestra la Figura 6-11: a) Farfield Polar Array con pesos de 16 elementos.



**Figura 6-11: a) Farfield Polar Array con pesos de 16 elementos y b) Farfield Cartesianas Array de 16 elementos con pesos**



**Figura 6-12: a) Colar Array con pesos de 16 elementos y b) Crosspolar Array de 16 elementos con pesos**

Cabe destacar por último, que los sistemas no apuntan a los 30° justos. Esto se debe a que se producen “acoplos” entre los elementos que forman los arrays y, cuanto mayor sea el número de estos elementos, mayor van a ser estas interferencias. La explicación a este fenómeno viene de que si en el array son solo dos elementos, en uno de ellos solamente vamos a tener interfiriendo al otro, pero si aumentamos el número hasta 4, ya son 3 los que vamos a tener alrededor y las ondas interferentes van a aumentar. Siguiendo este razonamiento, cuando llegamos a los 16 elementos, un elemento del centro del array va a tener muchas más ondas no deseadas que en el caso de 2, por tanto el sistema no va a apuntar tan bien como desearíamos.

## 7 Conclusiones

---

Para concluir este trabajo, podemos decir que las tecnologías GNSS están en progresión y que cuando queremos tener un sistema que cumpla una serie de características, como es que trabaje en un número de bandas dadas, las cuales son: L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5, E6.

El principal objetivo que ha seguido la realización de este trabajo es conseguir aumentar la ganancia de la antena que usamos para transmitir o recibir una onda, y hemos visto que eso solamente lo podemos conseguir cuando hacemos una agrupación de antenas y hacemos que estas trabajen de forma conjunta. Por otro lado, otro objetivo es el de apuntar a un lugar dado, aunque lo que estamos haciendo también con esto es hacer máxima nuestra ganancia, ya que si tenemos el lóbulo principal orientado a este lugar, vamos a alcanzar nuestra mejor forma de transmisión o de recepción. Como consecuencia de esto, las interferencias que le llegan al usuario en concreto son menores, ya que estamos haciendo que nuestro lóbulo principal caiga justo en su posición y disminuía estas.

Con este Trabajo de Fin de Grado he aprendido a hacer distintos tipos de array de antenas planar, cambiando el número de elementos que tienen y cómo conseguir que dicho array apunte a una dirección dada a través de lo que hemos denominado como pesos, que es el desfase entre los puertos de cada elemento.

Lo que podemos extraer de los resultados del apartado 6. Análisis de los resultados, es que si queremos apuntar a un ángulo en concreto, siempre vamos a tener un error, que es fruto de los acoplos de las distintas señales que mandan todos los elementos que conforman el array. Por otro lado, he podido observar que al aumentar el número de antenas del array, podemos conseguir que la ganancia aumente, llegando a valores que con un solo elemento no podríamos alcanzar.

Una forma de mejora de estos sistemas sería buscar formas de los arrays alternativas para maximizar todavía más las ganancias y hacer que el acople entre los elementos sea menor.



## 8 Líneas futuras

---

Como hemos indicado anteriormente, una propuesta para futuros casos de estudio es aumentar el retardo de grupo de la onda que se propaga entre los elementos mediante la implementación de planos de masa formados por estructuras EBG (Electromagnetic Band Gap), mediante las cuales se disminuirían las interferencias entre los elementos y se lograría una mejor actuación de los arrays.

También se podrían estudiar otro tipo de distribuciones geométricas, a través de las cuales se optimizaría también el comportamiento de los arrays logrando que, por ejemplo, apunten directamente a la dirección que deseamos, en lugar de en este caso que por acoplos no se puede lograr.

Por último, se podría desarrollar una red de alimentación mediante la herramienta ADS para los arrays propuestos, su integración en CST para ver el comportamiento EM, así como su fabricación y campaña de medidas en la cámara anecoica.

## 9 Bibliografía

---

- [1] D. C. F.-P. D. A. I. P.-N. Javier Arribas Lázaro, «GNSS Array-based Acquisition: Theory and Implementation,» Barcelona, 2012.
- [2] J. L. M. Campos, *Antenas y Compatibilidad electromagnética*, vol. Conceptos básicos de Antenas, Madrid, 2016/17, p. Tema 2. .
- [3] G. B. Ubero, «Desarrollo de una antena en tecnología microstrip para un sistema nano-SAR,» 2017.
- [4] G. F. Lanao, «Diseño de una antena impresa circular,» Madrid, 2011/12.
- [5] M. P. Fernández, «DESARROLLO DE UNA ANTENA BANDA ANCHA PARA SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.,» Madrid, España, 2017.
- [6] G. Z. Dr. Alison Brown, «HIGH GAIN ADVANCED GPS RECEIVER».
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and design*, United States of America: Wiley - Interscience, 2005.
- [8] O. M. D. A. a. D. D. Zarko Rosic, «Novel Method for Optimal Synthesis of 5G Millimeter Wave Linear Antenna Array,» *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017.
- [9] B. Z. H. A. S. M. Reza Gholami, «Reduction of Dynamic Range Ratio through Competition Over Resources to synthesize planar array antennas,» *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, pp. 1522-1531, 2016.
- [10] M. A. Salas Natera, «Contribution to Uncertainty Analyses and Calibration of Active Antenna Arrays,» Doctoral Thesis, Madrid, Spain, 2011.



## **Glosario**

---

Multi-Trayecto	Efecto que se crea por la colisión de las señales con diferentes obstáculos de nuestro alrededor, como puede ser un edificio.
Longitud de onda	Longitud de onda: distancia real que recorre una perturbación (onda) en un determinado intervalo de tiempo.
RHCP	Polarización circular a derechas.

## Anexos

### A Herramienta de diseño

La principal herramienta que hemos utilizado para la implementación de este TFG es Computer System Technology (CST), que es un programa muy completo que nos sirve para poder generar y simular elementos que radian ondas. Gracias a los resultados que nos proporciona, podemos evaluar si un sistema es mejor o peor, o si debemos modificar algo en nuestro diseño para hacerlo funcionar de manera óptima.

CST nos proporciona un gran abanico de posibilidades para poder hacer cualquier elemento que nosotros deseemos. Las diferentes funcionalidades que tiene son:

- **“Modeling”**(Figura 0-1: Menú Modeling de CST): Sirve para poder formar el elemento que queremos diseñar, podemos usar las distintas formas que vemos en el apartado de “Shape”. También podemos rotar un elemento (“Transform”), importar o exportar algún archivo (“Import/Export”) de otro programa que sea compatible con este, y seleccionar “picks” en una cara, arista, etc. de nuestro elemento. Además, podemos encontrar un historial donde podemos ir viendo los cambios que hemos ido efectuando.

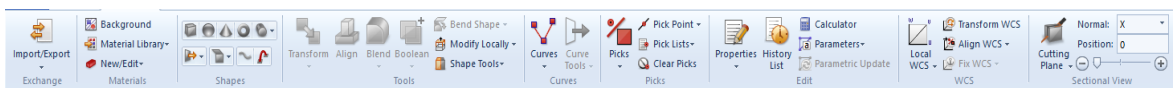


Figura 0-1: Menú Modeling de CST

- **“Simulation”**(Figura 0-2: Menú Simulation de CST): En esta pestaña vamos a poder simular nuestro proyecto para obtener los resultados del comportamiento de nuestro componente. En el apartado de “Sources and Loads” podemos elegir el tipo de puertos que va a tener dicho componte. Además, en el apartado de “Monitors”, cogeremos el tipo de monitores que vamos a querer ver: de campo E, campo H, Farfield, etc.

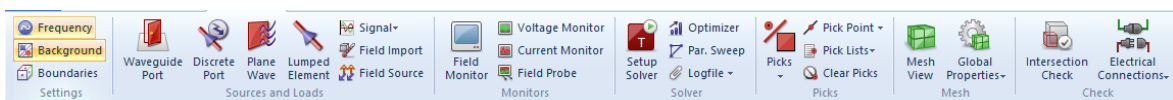
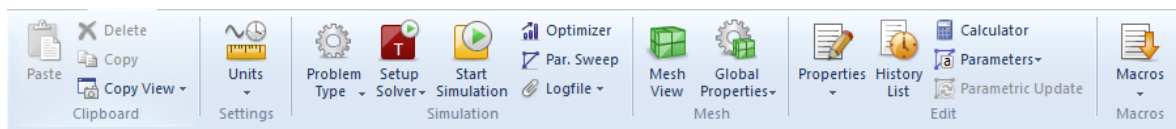


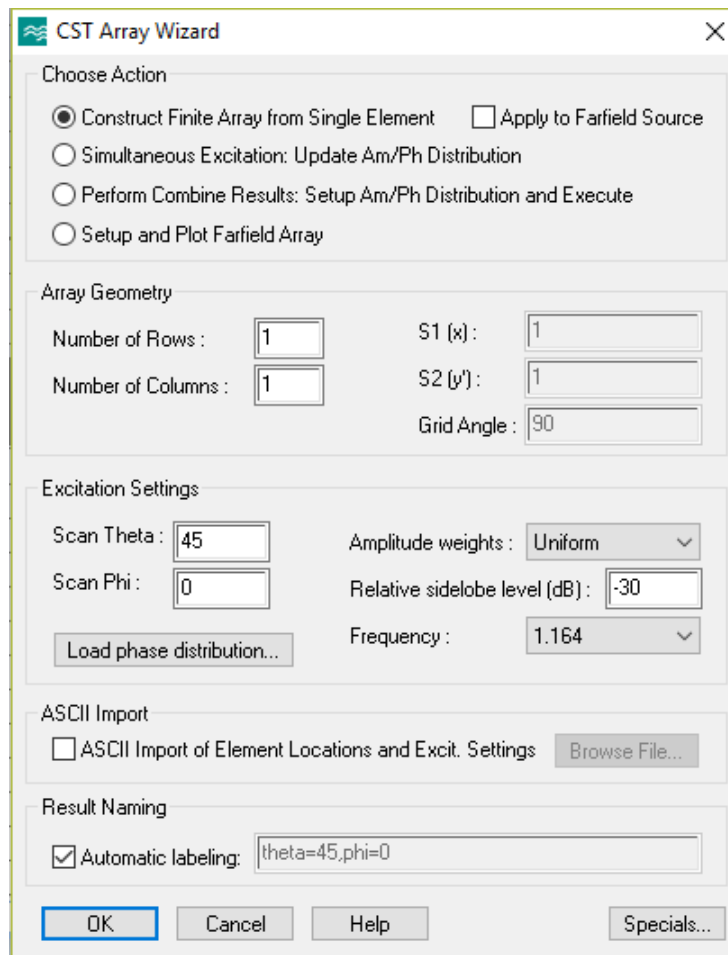
Figura 0-2: Menú Simulation de CST

- **“Home”** (Figura 0-3: Menú Home de CST): Donde podemos encontrar muchos de los apartados que hemos visto anteriormente. En esta pestaña en concreto, podemos ver el apartado “Macros”, donde aparece un “Wizard” que sirve de ayuda para poder hacer el array.



**Figura 0-3: Menú Home de CST**

Esta aplicación del programa tiene una serie de opciones como se puede observar en la Figura 0-4: CST Array Wizard. En ella podemos elegir el número de columnas y filas que va a tener el array y lo más importante la distancia que van a tener los elementos entre sí, lo cual va a determinar la actuación de nuestro array y los resultados posteriores en la simulación (nuestros casos de estudio se pueden encontrar detallados en la sección 5.1).



**Figura 0-4: CST Array Wizard**

## B Herramienta de cálculo

Otra de las herramientas utilizadas en nuestro desarrollo del TFG ha sido Matlab, la cual es una aplicación que hemos usado para obtener los pesos de los distintos puertos que debe tener el array para que logremos el objetivo de apuntar o desapuntar a un lugar dado. En ella, hemos ido definiendo las distintas ecuaciones matemáticas que necesitábamos para saber que valores introducir y, posteriormente sustituirlos en CST con el fin de simular el proyecto y lograr el objetivo de dirigir nuestro lóbulo principal a un lugar dado. Para este caso, usamos las ecuaciones que vienen detalladas en la sección 2.1 Array de antenas, con una pequeña variación, ya que en ella, la explicación es sobre arrays lineales y nuestro caso de estudio son los planares, por tanto, simplemente había que cambiar nuestro vector de posición (2.3) por uno en el que aparezcan los dos ejes sobre los que está situado el array y, como hemos explicado en dicha sección, sustituirlo en la fórmula del campo radiado de un array para obtener nuestro campo real. En este momento, podemos identificar nuestra variable  $\Psi$ , para determinar cual va a ser el margen visible de nuestro sistema y seguir copiando estas formulas en la herramienta en cuestión.

Una vez aclarado el funcionamiento de la herramienta y saber para qué la hemos utilizado, vamos a ver cuales son las ecuaciones que nos dan estos pesos que son de mucha importancia para el trabajo.

Primero definimos todas nuestras constantes, como son: la velocidad de la luz ( $c$ ), la frecuencia de trabajo de nuestro sistema ( $f = 1.36$  GHz), la longitud de onda ( $\lambda = c/f$ ) y la  $\epsilon$  efectiva, además del valor de  $\theta$ , que es el ángulo al que queremos que vaya dirigido nuestro lóbulo principal del array.

En segundo lugar, dependiendo del número de elementos en el array que tuviéramos, definimos un vector con los distintos valores para situar las coordenadas de cada uno de los componentes. Por ejemplo, en el caso de 2 elementos, el vector de las distancias entre ellos va a ser:  $[0 \ 0.15381235]$ ., donde el 0 es la coordenada  $x$  del primero y 0.15381235 se refiere a la del segundo elemento. Análogamente, en el vector del eje  $y$  tuvimos que poner  $[0 \ 0]$ , ya que ambos componentes están sobre este, como podemos ver en la Figura 5-9: Array de 2 elementos.

A continuación, desarrollamos el propio array en Matlab, para ello precisamos de un bucle que tuvo que ir rellenando nuestro vector de los pesos con los valores. Dentro de este bucle, simplemente calculamos los resultados del vector de apuntamiento mediante la fórmula (0.0) donde.

$$\text{Vector apuntamiento} = e^{\frac{-li*2\pi*dx*\sin(\theta)*\cos(\phi)}{\lambda}} * e^{\frac{-li*2\pi*dy*\sin(\theta)*\sin(\phi)}{\lambda}} \quad (0.0)$$

Por último, estos valores devueltos por el bucle son complejos, por tanto tuvimos que hallar el ángulo (mediante la función “angle” de Matlab) y pasarlo a grados, ya que los devuelve en radianes.

```

1 - close all
2 - clc
3 - clear all
4
5 %% Variables y constantes
6
7 - Theta0 = 30;           % degrees
8 - Phi0   = 0;           % degrees
9
10 - c      = 3e8;          % m/s
11 - f      = 1.3653e9;     % Hz, 9 GHz
12 - lambda = c/f;         % m
13 - epsilon = 3.5;        % RF35
14
15 - epsilonR = epsilon*0.63 % epsilon efectiva
16
17 % Numero de elementos
18 - MM      = 2;          % columnas X
19 - NN      = 1;          % filas Y
20
21 - dx      = [0 153.81235/1000]; % 0.5*lambda*sqrt(epsilonR); %distancia entre elementos (X)
22 - dy      = [0 0];          % 0.5*lambda*sqrt(epsilonR); %distancia entre elementos (Y)
23
24 - AB_M    = [6.3, 6.3];    %M elementos -> OJO dBi
25 - AB_N    = [6.3];        %N elementos
26
27 %% Definicion del Array, amplitud y fase
28
29 - AB=zeros(NN,MM);
30 - for ii = 1:NN
31 -     for kk = 1:MM
32 -         if (AB_N(ii) >= AB_M(kk))
33 -             AB(ii,kk) = AB_N(ii);
34 -         else
35 -             AB(ii,kk) = AB_M(kk);
36 -         end
37 -     end
38 - end

```

**Figura 0-5: Matlab**

Finalmente, tras ejecutar el programa, obtuvimos los tres vectores con los valores que posteriormente fueron introducidos dentro de los puertos y así conseguimos que el array apuntara a la dirección que queríamos. Los distintos vectores son los que se explican en las siguientes tablas.

**Tabla 0.1: Tabla de desfases para apuntamiento en array de 2 elementos**

	Elemento 1	Elemento 2
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°

**Tabla 0.2: Tabla de desfases para apuntamiento en array de 4 elementos**

	Elemento 1	Elemento 2
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°
	Elemento 3	Elemento 4
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°



**Tabla 0.3: Tabla de desfases para apuntamiento en array de 16 elementos**

	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3	Elemento 4
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°	0°	-126°
	Elemento 5	Elemento 6	Elemento 7	Elemento 8
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°	0°	-126°
	Elemento 9	Elemento 10	Elemento 11	Elemento 12
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°	0°	-126°
	Elemento 13	Elemento 14	Elemento 15	Elemento 16
Desfase que sumar en cada puerto	0°	-126°	0°	-126 °